

ÉCOLOGIE OPÉRATIONNELLE ASSISTÉE PAR ORDINATEUR

M. BOUCHÉ

Préface de F. di CASTRI



masson **m**

ÉCOLOGIE OPÉRATIONNELLE ASSISTÉE PAR ORDINATEUR

Marcel BOUCHÉ

*Docteur ès sciences
Directeur de recherches INRA
au CNRS*

Préface de
Francesco di CASTRI

Publié avec le concours
du Centre National des Lettres

MASSON Paris Milan Barcelone Mexico 1990

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays.

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (loi du 11 mars 1957 art. 40 et 41 et Code pénal art. 425).

Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français du copyright, 6 bis, rue Gabriel-Laumain, 75010 Paris. Tél. : 48.24.98.30.

© *Masson. Paris. 1990*

ISBN : 2-225-82183-6

Masson
Masson S.p.A.
Masson S.A.
Masson Editores

120. Bd Saint-Germain, 75280 Paris Cedex 06
Via Statuto 2/4, 20121 Milano
Balmes 151, 08008 Barcelona
Dakota 383, Colonia Nápoles, 03810 Mexico DF

ÉCOLOGIE OPÉRATIONNELLE ASSISTÉE PAR ORDINATEUR



CHEZ LE MÊME ÉDITEUR

- Abrégé D'écologie Générale, par R. Barbault. *Abrégés de Sciences*. 1990, 2^e édition, à paraître.
- Écologie des populations et des peuplements. Des théories aux faits, par R. Barbault. *Biologie-Maîtrises*. 1981, 208 pages.
- Abrégé d'écologie de la végétation terrestre, par M. Godron. *Abrégés de Sciences*. 1984, 200 pages.
- Introduction à une biologie des populations, par J.-M. Legay et D. DebOUZIE. 1985, 152 pages.
- Dynamique des populations, par R. Dajoz. *Collection d'Écologie*. n° 6. 1974, 312 pages.
- Stratégie d'échantillonnage en écologie, sous la direction de S. Frontier. *Collection d'Écologie*. n° 17. 1983, 512 pages.
- ÉCOSYSTÈMES STRUCTURE, FONCTIONNEMENT ET ÉVOLUTION, par S. FRONTIER et D. Viale. *Collection d'Écologie*. 1990, à paraître.
- Biogéographie évolutive, par J. Blondel. *Collection d'Écologie*. n° 20. 1986, 232 pages.
- Les mutagènes de l'environnement et leurs effets biologiques, par A. Léonard. 1990, 320 pages.
- Fondements rationnels de L'aménagement dun territoire, sous la direction de M. Lamotte. *Écologie Appliquée et Sciences de l'Environnement*, n° 6. 1985, 184 pages.
- La CARTOGRAPHIE écologique et SES applications, par P. Ozenda. *Écologie Appliquée et Sciences de l'Environnement*. n° 7. 1986, 160 pages.
- Écologie des ressources naturelles, par F. Ramade. *Écologie Appliquée et Sciences de l'Environnement*, n° 4. 1981, 334 pages.
- Écosystèmes pélagiques marins, par G. Jacques et P. Tréguer. *Collection d'Écologie*. n° 19. 1986, 256 pages.
- Écologie numérique, par L. Legendre et P. Legendre. *Collection d'Écologie*. n° 12 et 13. 1984, 2^e éditions revues et augmentées.
Tome 1. — Le traitement multiple des données écologiques. 280 pages.
Tome 2. — La structure des données écologiques. 344 pages.
- Modèles dynamiques déterministes en biologie, sous la direction de J.-D. Lebréton et C. Millier. 1982, 208 pages.

PREFACE

La prise de conscience sur les problèmes de l'environnement est en train d'atteindre des dimensions planétaires, même en ce qui concerne le grand public, aussi bien dans les pays industrialisés que dans ceux du Tiers Monde. La crise de l'environnement se manifeste tantôt à cause d'un développement trop accéléré et mal planifié (pollution de l'air, pluies acides, contamination des eaux de surface et souterraines, mauvaise gestion des déchets), tantôt en raison du sous-développement (déforestation tropicales, désertification, érosion des sols).

Moins connu est le fait qu'il y a une grande difficulté dans les recherches sur l'environnement et sur l'écologie, d'obtenir des résultats fiables et pertinents, et - encore plus - d'insérer ces résultats dans le domaine des applications concrètes. De ce fait, la dégradation de notre environnement ne fait que progresser, en dépit de tous les efforts consentis.

Il est bien évident que les médias commencent à être imprégnés d'informations sur l'environnement, trop souvent axées sur des bases scientifiques douteuses, et qu'il y a une prolifération de nouveaux livres traitant de l'écologie et de l'environnement, ces deux termes - d'ailleurs - étant souvent abusivement confondus.

L'ouvrage de M. Bouché, que j'ai lu avec une saisissante attention, a ceci de particulier qu'il est très différent de tous les autres livres qui apparaissent presque en même temps, et qu'il est très rafraîchissant en dépit de la complexité des thèmes traités.

D'où vient cette originalité ?

En premier lieu, il faut évoquer la personnalité et la carrière de M. Bouché. En donnant à ce terme le sens le plus noble, M. Bouche a souvent été un "marginal". Loin de se laisser embrigader dans des courants aux modes passagères, et grâce, à sa grande intuition et vaste curiosité scientifiques, M. Bouché a toujours maintenu un oeil critique et lucide sur les progrès cycliques de l'écologie. En outre, il a toujours su conjuguer à l'unisson la théorie et la pratique de l'écologie, le retour aux sources de cette discipline et la vision de ses développements futurs. En deuxième lieu, M. Bouché a eu le souci d'une rigueur extrême, rigueur dans le choix des termes à employer et des méthodes à suivre et rigueur dans l'interprétation des résultats obtenus. Et ceci est d'autant plus remarquable, qu'une certaine écologie souffre à présent d'une dérive, dangereuse vers la facilité et l'improvisation.

Dans un ouvrage bien structuré en trois parties, "Les Fondements", "L'Elaboration" et "Les Développements", qui est extrêmement riche autant en mises au point qu'en idées nouvelles, il est difficile de mettre en évidence un petit nombre de points forts. Personnellement, j'ai été particulièrement attiré par deux aspects qui peuvent être considérés comme les deux facettes extrêmes de l'ouvrage.

A un extrême, M. Bouché a méticuleusement débroussaillé la lourdeur sémantique de l'écologie en recherchant l'étymologie et l'origine de chaque terme, en éclairant des concepts lorsque les versions antérieures se prêtaient à la confusion, en établissant les priorités chronologiques de ces termes et concepts sur la base d'une révision bibliographique très vaste et peu accessible. Cette révision est si complète et empreinte d'un esprit si rigoureux qu'elle représente *per se* une contribution d'une importance épistémologique certaine. Dans notre vocabulaire écologique si malmené, on peut finalement savoir à quoi l'auteur se réfère en toute justesse.

A l'autre extrême, qui est au cœur même du titre de l'ouvrage "Ecologie opérationnelle assistée par ordinateur", il faut remarquer le traitement à la fois lucide et pragmatique des dérivations de l'intelligence Artificielle dont les Systèmes-Experts. Je me réfère surtout, en toute connaissance, à la base de données ECORDRE à laquelle l'auteur et ses collaborateurs ont consacré l'essentiel des 5-6 dernières années de recherches, sans compter l'acquisition de données qui constitue le travail de toute une vie. Je ne doute pas que ces méthodes permettront de faire face avec succès aux difficultés traditionnelles de l'écologie : tels la complexité, l'hétérogénéité et les changements d'échelle (qui représentent actuellement le problème le plus sérieux du programme international sur les changements climatiques planétaires). Ces méthodes donnent en outre une autre vision de l'interdisciplinarité, de l'extrapolation des données et de l'incorporation des résultats dans les processus de prise de décision. Ainsi l'écologie deviendra opérationnelle.

Il est indéniable que l'écologie est appelée à avoir une dimension de plus en plus importante, aux niveaux locaux, nationaux et planétaire, avec des implications aussi bien scientifiques que gestionnaires, relevant autant de la politique d'un pays donné que des relations entre les pays. L'ouvrage de M. Bouché constituera une contribution très valable pour éclaircir les régies du jeu de la pensée et de la pratique écologiques.

Francesco di Castri
Président du SCOPE

Comité Scientifique sur les Problèmes de l'Environnement

TABLE DES MATIERES

Préface	V
Avertissement.....	7

Première Partie : Les Fondements

Chapitre 1 - Notions générales

1.1. Clarification conceptuelle.....	18
1.2. L'écologie et les disciplines connexes	
1.2.1. L'écologie.....	20
1.2.2. Histoire naturelle et écologie.....	23
1.2.3. Ecologie et réfutabilité.....	24
1.2.4. Ecologie et sciences humaines.....	27
1.2.5. Ecologie et interdisciplinarité.....	28
1.3. L'information écologique	
1.3.1. Introduction.....	31
1.3.2. Données et connaissances.....	32
1.3.3. Formes et fonctions.....	43
1.3.4. Les types d'études écologiques et leurs pratiques.....	46
1.4. Propriétés fondamentales matière-énergie	
1.4.1. Introduction.....	52
1.4.2. Les interactions électromagnétiques.....	53
1.4.3. Les interactions gravitationnelles.....	61
1.4.4. Les interactions faibles : la radioactivité.....	61
1.5. Vie et abios	
1.5.1. Introduction.....	63
1.5.2. Eléments de thermodynamique.....	64
1.5.3. Etats métastables.....	67
1.5.4. Information, désordre et complexité biophysicochimique.....	67
1.5.5. La compétition.....	69
1.6. Organisation et organisation	
1.6.1. Les systèmes écologiques : leur organisation vers la complexité.....	72
1.6.2. Emergence de la vie.....	74
1.6.3. Vie et écologie.....	76
1.6.4. Le métabolisme.....	77
1.6.5. Organisation métabolique.....	80
1.6.6. Le métabolisme.....	82
1.6.7. La biomasse.....	85
1.6.8. La nécromasse.....	86
1.6.9. Carbonates, minéralomasse et chéradomasse.....	87
1.7. Systémique écologique	
1.7.1. L'information en écologie.....	88
1.7.2. Les systèmes écologiques et systèmes.....	91
1.7.3. Les hiérarchies opérationnelles.....	94

1.7.4.	L'information sur les systèmes écologiques.....	95
1.7.5.	Caractéristiques écologiques et études systémiques opérationnelles.....	96
1.7.6.	Formalisation de l'écologie opérationnelle.....	98
1.7.7.	Connaissances et intelligence du domaine écologique.....	101
1.7.8.	Position opérationnelle de l'écologue.....	103
1.7.9.	Ecologie opérationnelle et discriminante : théorie.....	105

Chapitre II - Les systèmes écologiques

2.1.	Notion d'écosystème.....	107
2.2.	Constituants majeurs (états)	
2.2.1.	Introduction à l'écosphère.....	109
2.2.2.	L'eau.....	109
2.2.3.	Les gaz : l'air.....	110
2.2.4.	Lumière et rayonnements énergétiques.....	112
2.2.5.	La température.....	113
2.2.6.	Solides dans l'écosphère.....	115
2.2.7.	Eléments biogènes.....	116
2.2.8.	Constituants de l'écosphère.....	118
2.3.	Cinèses (mouvements et blocages)	
2.3.1.	Motricité générale.....	119
2.3.2.	Mouvements gazeux : l'atmosphère.....	120
2.3.3.	Mouvements et blocages hydriques.....	121
2.3.4.	Mouvements et blocages des solides.....	123
2.3.5.	Mouvements et blocages chimio-énergétiques.....	124
2.3.6.	Mouvements et blocages biologiques.....	124
2.3.7.	Mouvements et blocages porosphériques.....	130
2.3.8.	Mouvements verticaux : notion de pieu.....	131
2.4.	Organisations systémiques	
2.4.1.	Synthèse végétale : organisation.....	133
2.4.2.	Emanations végétales.....	136
2.4.3.	Stockages et cinèses endogées.....	137
2.4.4.	Le subécosystème endogé.....	143
2.4.5.	Hydrosphère : systèmes aqueux.....	154
2.5.	Formalisation des échanges énergie-matière	
2.5.1.	Couplage des cinèses d'énergie et matière.....	156
2.5.2.	Modélisation écologique conceptuelle.....	157
2.5.3.	Bilan des transferts.....	163
2.5.4.	Cycles des éléments.....	164
2.5.5.	L'hémicycle énergétique.....	175
2.5.6.	Cycles, écosystémique et recherche opérationnelle formalisée.....	176
2.6.	L'évolution	
2.6.1.	Transformation diachronique des systèmes écologiques.....	177
2.6.2.	Les échelles de temps.....	179
2.6.3.	Réfutabilité des hypothèses évolutionnistes.....	180
2.6.4.	Evolution des domaines écologiques : genèse des systèmes actuels.....	182
2.6.5.	Stabilité et évolution complexifiante de sous-systèmes biologiques.....	183
2.6.6.	Sélection, innovations et duplications.....	184
2.6.7.	L'évolution biologique et la spéciation.....	187
2.6.8.	Mise en place des grands phylums : phylogenèse.....	188

2.7. Modalités d'études écologiques	
2.7.1. Division de l'écosphère.....	191
2.7.2. Les hémisystèmes biologiques.....	193
2.7.3. Les hémisystèmes abiotiques.....	195
2.7.4. Disciplines écologiques.....	196
Chapitre III - Les sous-systèmes biologiques (écologie biologique)	
3.1. Biologie et écologie.....	201
3.2. Vie et milieu	
3.2.1. La continuité vitale.....	203
3.2.2. Les contraintes.....	204
3.2.3. L'adaptation aux systèmes écologiques.....	205
3.3. Adaptations individuelles comparées	
3.3.1. Intégration morphofonctionnelle (simplicité $i > s$ complexité).....	206
3.3.2. Modalités temporelles d'adaptation aux contraintes.....	207
3.3.3. Modalités spatiales d'adaptation aux contraintes.....	211
3.3.4. Continuité vitale et ontogenèse.....	211
3.3.5. Expressions mésologiques : polymorphisme mésologique.....	213
3.4. Adaptations des populations	
3.4.1. Mutabilité et brassage génétique : polymorphisme et spéciation.....	214
3.4.2. Plasticité génétique et polymorphisme.....	216
3.4.3. Sexualité et agamie.....	217
3.5. Agencements biocénétiques	
3.5.1. Mécanismes.....	21b
3.5.2. Rôles : les actions sur le milieu.....	222
3.5.3. Interactions biotiques.....	225
3.5.4. Les chaînes trophiques.....	229
3.5.5. Descriptions fréquentielles.....	231
3.5.6. Répartition, succession et diversité.....	233
3.6. L'interprétation des organismes	
3.6.1. Interfaces systémiques et classifications interprétatives.....	234
3.6.2. Limites des interprétations.....	237
3.6.3. Classements écobiotiques des organismes.....	241
3.6.4. Classements taxonomiques et phylogénèse.....	250
3.6.5. La taxonomie en pratique.....	256

Deuxième Partie. : L'élaboration

Chapitre IV - Acquisition d'information

4.1. Introduction à l'acquisition des données.....	263
4.2. La donnée : élément d'information sur le champ écologique	
4.2.1. Données et liens.....	265
4.2.2. Sélection des données et options.....	267
4.2.3. Liens des données au champ écologique.....	269
4.2.4. Collecte des données.....	270

4.3.	Le prélevai	
4.3.1.	Notion de prélèvement.....	275
4.3.2.	Options chronologiques sur les prélèvements.....	276
4.3.3.	Options spatiales : prélèvements euclidiens, cartésiens, informels et ponctuels.....	277
4.3.4.	Composition, médiation et métrique dans le champ écologique.....	280
4.3.5.	Associations de prélèvements (prélèvements associés et l'associateur).....	282
4.4.	Les ensembles de données	
4.4.1.	Objectifs, ensembles et caractéristiques.....	283
4.4.2.	Options sur les ensembles.....	285
4.4.3.	Options et contraintes d'acquisition.....	288
4.4.4.	Qualité des données et des ensembles : les erreurs.....	289
4.5.	La saisie des données initiales	
4.5.1.	La saisie.....	290
4.5.2.	Les données provisoires avant saisie.....	290
4.5.3.	Le cas des données continues.....	291
4.5.4.	Collections et enregistrements (données non saisies).....	291
4.6.	Les liens entre données	
4.6.1.	L'organisation des données.....	292
4.6.2.	Situations des prélèvements dans le champ écologique.....	292
4.6.3.	Champ écologique et informations.....	294
4.6.4.	Le référentiel des données.....	296
4.7.	L'acquisition des données : principes et optimisation.....	298
Chapitre V - Utilisation des connaissances		
5.1.	Introduction.....	299
5.2.	Les pratiques habituelles actuelles	
5.2.1.	Démarches classiques.....	300
5.2.2.	L'élaboration d'un protocole.....	300
5.2.3.	L'acquisition des données.....	301
5.2.4.	Traitement et interprétation des données.....	302
5.2.5.	La publication.....	304
5.2.6.	L'usage des résultats.....	305
5.2.7.	Les limites de la démarche actuelle.....	305
5.3.	Les pratiques souhaitables	
5.3.1.	Introduction.....	307
5.3.2.	Mouvements et synthèse d'informations.....	307
5.3.3.	Connaissances et Intelligence Artificielle.....	309
5.4.	La gestion des données	
5.4.1.	introduction.....	312
5.4.2.	Les choix analytiques.....	313
5.4.3.	L'interprétation : les choix synthétiques.....	313
5.4.4.	Les fichiers et le problème multidimensionnel des relations écologiques.....	315
5.4.5.	Les bases de données.....	317
5.4.6.	Une application à l'écologie : ECORDRE.....	321
5.5.	Les bases de données et l'élaboration des connaissances.....	334

Chapitre VI - Interprétation synthétique

6.1. Introduction à l'interprétation	
6.1.1. Modalités d'interprétation.....	335
6.1.2. Objectifs d'interprétation.....	337
6.1.3. Moyens d'interprétation.....	341
6.2. Faits et hypothèses fondant la synthèse	
6.2.1. Globalyse et champ écologique.....	344
6.2.2. Les propositions (ou hypothèses dans la synthèse).....	344
6.2.3. Rôle opérationnel des hypothèses.....	347
6.2.4. Nature et signification des données dans l'interprétation.....	348
6.2.5. Approximations successives et lois.....	350
6.2.6. Contrôle des hypothèses ou réfutation.....	351
6.3. Préparation des synthèses	
6.3.1. Améliorations des moyens de synthèse.....	355
6.3.2. Les deux modalités itératives de synthèse, ou PRACs.....	357
6.3.3. Tablation.....	359
6.4. Comparaison typologique	
6.4.1. Choix de l'étude descriptive.....	367
6.4.2. Comparaisons multivariées.....	368
6.4.3. Typologie et classification.....	374
6.4.4. Redondances et optimisation du PRAC.....	378
6.4.5. Présentation des connaissances.....	382
6.4.6. Des études multivariées aux analyses paucidimensionnelles.....	383
6.5. Estimations et décisions	
6.5.1. La démarche.....	384
6.5.2. L'estimation.....	386
6.5.3. La décision.....	388
6.6. Modélisation systémique	
6.6.1. Modélisation.....	390
6.6.2. Théories et pratiques des systèmes.....	391
6.6.3. Notions et pratiques des modèles.....	393
6.6.4. Les modèles opérationnels.....	398
6.6.5. La synthèse écosystémique.....	402
6.6.6. Modèles et systèmes réels.....	416

Chapitre VII - Intégration

7.1. L'intégration des connaissances	
7.1.1. Introduction.....	421
7.1.2. Ecologie discriminante.....	422
7.1.3. Processus Répétitifs d'Accroissement des Connaissances.....	424
7.1.4. Demandes sociales et accroissement intégré des connaissances.....	426
7.2. Les moyens de l'intégration	
7.2.1. Rôle des Bases de Connaissances.....	428
7.2.2. Intelligence Artificielle et démarches écologiques.....	433
7.2.3. Demandes et problématiques.....	436
7.2.4. Problématique et objectifs efficaces.....	437
7.2.5. Ecologie discriminante et rigueur opérationnelle.....	441
7.2.6. Acquisitions nécessaires intégrables.....	443
7.2.7. Optimisation des acquisitions de données.....	445

7.3.	Conséquences opérationnelles de l'intelligence Artificielle	
7.3.1.	Progrès et anachronismes.....	448
7.3.2.	Théories écologiques et systémiques opérationnelles.....	450
7.3.3.	La paraécologie.....	452
7.3.4.	L'inadéquation des données.....	453
7.3.5.	Faux problèmes ou dualismes anachroniques.....	455
7.4.	L'organisation écologique	
7.4.1.	Inconfort intellectuel, théorie et rigueur.....	460
7.4.2.	Le contexte informatique.....	462
7.4.3.	L'écologie opérationnel.....	464

Troisième Partie : Développements

Chapitre Vlii - Applications et applicabilité

8.1.	Position de l'écologie appliquée.....	468
8.2.	Modalités d'application.....	472
8.3.	L'étude rationnelle <i>a priori</i>	
8.3.1.	Modalités.....	477
8.3.2.	Changement de perspective par l'écologie.....	478
8.3.3.	Prédictibilité.....	483
8.3.4.	Gestion intégrée des richesses de l'espace.....	485
8.3.5.	Du plausible à l'évaluation écologique rationnelle.....	488
8.4.	L'approche traditionnelle <i>a posteriori</i>	
8.4.1.	Contexte.....	490
8.4.2.	Motivations des constats écologiques.....	492
8.4.3.	Prédictibilité des constats.....	493
8.4.4.	Domaines d'application des constats.....	495
8.4.5.	Sélection des caractéristiques de constats.....	495
8.4.6.	Approfondissement des constats.....	499
8.5.	Applications en fonction de niveaux de perception	
8.5.1.	Usages des syntégrons et subécosystèmes.....	500
8.5.2.	Connaissance des écosystèmes et usages des parcelles.....	501
8.5.3.	Ecumes et modifications régionales.....	508
8.5.4.	Ecosphère et activités anthropiques.....	513
8.6.	Perspectives et applicabilité	
8.6.1.	Introduction.....	515
8.6.2.	Optimisation utilitaire des milieux.....	517
8.6.3.	La rétroaction : le rôle culturel.....	522
8.6.4.	L'action.....	528

Chapitre IX - Conclusion

Références bibliographiques.....	546
Connaissances relatives aux loinbriciens.....	563
Index d'écologie opérationnelle.....	564

AVERTISSEMENT

Comme nous le verrons, l'écologie est une science globale. Nous nous contenterons de dire dans ce prologue que son domaine porte sur l'étude de l'ensemble des constituants de nos milieux, vivants ou non. Cette première indication n'est pas une définition : celle-ci sera donnée et discutée rigoureusement avec les concepts généraux de l'écologie au chapitre I. Elle nous suffit cependant pour décrire le cadre de l'ouvrage.

Ce livre n'est qu'un essai, une contribution à l'écologie. Cette discipline a en effet été perçue, et plus ou moins confusément présentée, par les naturalistes du XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècle. Elle reçut sa définition rigoureuse par l'un d'entre eux. Son très vaste domaine n'offrait alors rien de choquant car les savants de cette époque embrassaient volontiers les sciences exactes, alors peu approfondies ; physique, biologie, chimie, météorologie, océanographie et géologie pouvaient encore être perçues simultanément par un seul savant.

Depuis cette époque, nos connaissances se sont accrues considérablement en volume et les applications économiques de celles-ci se sont multipliées sur certains cas concrets ; il en a découlé une nécessité de spécialisation. On comprend dès lors que l'écologie, en tant que science cohérente globale, ait passablement souffert de cette spécialisation même si, dans quelques domaines biologiques, on sentait le besoin d'interprétations non sectorielles.

Historiquement, les disciplines qui, à des titres divers contribuent partiellement à l'écologie, ont prospéré indépendamment les unes des autres et avec une très grande hétérogénéité. Certaines s'appuyant sur une tradition d'amateurisme (comme l'ornithologie, l'entomologie, l'orchidophilie) ou sur des applications concrètes (comme la génétique, la chimie ou la pédologie) se sont développées et approfondies tandis que d'autres, moins attrayantes et sans rendement lucratif (études des racines, de la biologie des sédiments marins, etc.), sont restées embryonnaires. Jusqu'aux années '60, le mot écologie était encore peu employé, souvent fort vaguement et hors de son sens complet ; la recherche et l'enseignement de cette discipline étaient évanescents. Face à l'hégémonie de quelques spécialités dominant les sciences et techniques, l'écologie éclatée ne pouvait être opérationnelle.

Cette spécialisation, morcelant les sciences et techniques, a elle-même enfanté une résurgence de l'écologie. Les travaux des spécialistes sont apparus comme de plus en plus sectoriels et non confrontables ; ils sont souvent littéralement a-scientifiques malgré les prouesses de leurs détails. Au plan technique, les applications agronomiques, médicales, cynégétiques, halieutiques, etc. se sont heurtées à des difficultés, voire à des échecs, les décisions d'action ayant été prises après des études qui n'intégraient pas un savoir assez large. Les mentalités scientifiques et techniques, issues de la spécialisation à outrance, s'avèrent (et s'avèrent largement encore) incapables à répondre aux difficultés résultant des applications issues d'approches ponctuelles. Ces difficultés ont elles-mêmes engendré une réaction sociale et politique : l'écologisme (à ne pas confondre avec l'écologie, voir le paragraphe 1.2.1.).

D'où la résurgence, peut-être plus rapide dans la mentalité publique que dans celle de l'intelligentsia, du mot "écologie". D'où une certaine hâte à combler le vide béant, résultant de l'absence d'une écologie opérationnelle, par des actions souvent grossières et maladroites... La demande sociale, devançant le développement de la discipline, a placé cette dernière dans une position littéralement intenable.

Une grande confusion en a résulté. Cette confusion a été amplifiée par la désinformation généralisée, à tous les niveaux et a laissé place aux propos pseudo-scientifiques les plus débridés.

Cette résurgence de l'"écologie" s'est amorcée *grosso modo* il y a un quart de siècle, une génération ; elle n'en est certainement qu'à son début car l'écologie, celle

science occultée (mais parfaitement définie en 1866 !) est en retard. Sa carence a été suppléée "en attendant" par les moyens disponibles, que l'on feint trop souvent de prendre pour adéquats.

Nous pouvons aujourd'hui, avec un certain recul, considérer cette résurgence et en constater les conséquences positives et négatives.

Au plan scientifique, les objectifs des recherches des spécialistes ont été réorientés vers une approche plus globale, plus synthétique. Néanmoins, concrètement, ces recherches sont restées très morcelées car elles s'appuient naturellement sur les développements antérieurs des spécialités.

Certains chercheurs, insatisfaits de ce cantonnement sur une pièce d'un puzzle incomplet, ont entrepris des réflexions hardies qui ont conduit à des propositions de recherche ambitieuses et intégrées, dont le plus bel exemple est le Programme Biologique International (PBI, 1964-1974) (WORTHINGTON, 1975). Ces objectifs, concrètement impossibles à atteindre, ont toutefois orienté les thématiques de nombreux chercheurs modernes vers l'approche exhaustive et ont fait ressortir les carences et incohérences profondes des travaux spécialisés. Simultanément, des spécialistes d'origines variées ont appris à cohabiter, se connaître et s'apprécier, mais ont aussi atteint les limites des simples coalescences permises par ("interdisciplinarité").

Des chercheurs, visant à plus de synthèse et sans attendre données et moyens concrets, ont proposé des théories grandioses qui se sont traduites par la création d'un corpus synthétique spéculatif. Ce corpus trouve parfois sa vérification ; mais, présentement, trop fondé sur l'imaginaire, a aussi des effets pervers. Poussé par la nécessité de présenter des synthèses prématurées ou par le besoin de combler un vide scientilico-technique, la spéculation a donné libre court à une théorisation déconnectée du réel et à la présentation de "résultats" hasardeux, (les derniers sortent en fait du domaine scientifique et donc, au sens strict, de l'écologie, quoiqu'ils en portent le label dans les revues scientifiques internationales du domaine.

(ette écologie spéculative a par ailleurs habitué nombre de chercheurs à un certain laxisme intellectuel et a engendré une répulsion pour les travaux rigoureux, souvent laborieux, longs, ésotériques, et... inhabituels. Introduire, ou restituer, la rigueur constitue une gêne, souvent irritante. A l'inverse, ces démarches spéculatives, soulignant, la lenteur des progrès d'une écologie authentiquement scientifique, ont entraîné une réaction académique frileuse d'abandon, puis de refuge, vers les disciplines spécialisées de la physique, la biologie ou la chimie, plus confortablement assises sur des approches spécialisées rigoureuses dont l'objet réduit se prête aux démonstrations simples.

(ette résurgence de l'écologie s'est accompagnée d'un phénomène parallèle dans les domaines techniques connexes. Les techniciens des domaines concernés (agronomie, foresterie, pêche, aménagement du territoire, médecine, etc.), forts de leurs traditions, ont eu d'abord le plus grand mal à accepter l'idée que leur monde n'était pas circonscrit, que leur savoir-faire pouvait être remis en cause, que les outils de plus en plus puissants que leur fournit la technique moderne (du boteur à l'énergie nucléaire, du pesticide aux détergents, ou aux prochains génotypes manipulés,...) devraient être utilisés avec une prudence d'autant plus grande que leur pratique est plus conséquente et est en fait remise en cause par l'évolution rapide des techniques. La tradition séculaire qui servait de garde-fou avait disparu et les méconnaissances écologiques apparaissaient.

Ainsi les activités techniques tendent à intégrer, d'abord de mauvais gré sous la contrainte des faits, ensuite volontairement, une approche plus synthétique où l'écologie joue (ou plutôt devrait jouer, si elle était opérationnelle) un rôle croissant de science appliquée. Ici encore, l'opportunisme, l'absence de méthodes, la nécessité de parer au plus pressé ont conduit, et conduisent, à des carences qui restent 1res

générales, mais ici aussi un certain recul permet de mieux dégager ces carences et parfois de proposer des solutions.

Un nouveau corps de techniciens, les environiciens (p. 21), tend même à se constituer à côté d'administratifs (Environmental Protection Agency aux USA, Ministère de l'environnement en France, etc.) pour couvrir les domaines laissés vacants entre les techniques traditionnelles.

Comme nous venons de le constater, l'écologie malgré sa respectable ancienneté, est une discipline au développement très récent qui s'est constituée de bric et de broc à partir de spécialités d'orientations initialement divergentes. Notamment en raison de la pression publique, réagissant contre certaines maladresses techniques, elle s'est agglutinée hâtivement pour combler les insuffisances. Cette incohérence initiale, et l'absence de certains morceaux du puzzle, font qu'un bel imbroglio existe encore présentement. Il est certain que méthodes et démarches rigoureuses sont prioritaires pour dégager une écologie générale, unitaire, cohérente et opérationnelle.

Le présent ouvrage s'efforce de trier les acquis scientifiques, le langage précis et les méthodes éprouvées, permettant une écologie réellement scientifique et des applications techniques mieux fondées. Les démarches globales perçues par le naturaliste du XIXème siècle sont devenues possibles ; les scientifiques ont une meilleure perception de la nécessité de l'interdisciplinarité ; les techniciens acceptent le dialogue.

L'interdisciplinarité est à la mode : elle ne saurait suffire. La nécessité d'une science (l'écologie) et de techniques (notamment sur l'environnement) transdisciplinaires est le ciment de l'interdisciplinarité. Ce ne sont plus des souhaits irréalistes : des techniques de saisie d'informations globales existent, les progrès très rapides des ordinateurs et des logiciels rendent possibles un usage global des connaissances, y compris des suppositions suppléant temporairement aux faits objectifs et aux hypothèses testables. Il est aujourd'hui possible, à côté des spécialités scientifiques et techniques pré-existantes, qui fournissent une myriade d'informations inaccessibles au XIXème siècle, de pratiquer une écologie fondamentale et appliquée, à l'aide de puissants outils de synthèse accessibles par ordinateur.

La vision globale des grands naturalistes du XIXème siècle tels que LAMARCK, Von Humbolt, Darwin, Haeckel, Muller ... ne pouvait, se concilier avec l'augmentation de faits analytiques de plus en plus précis, particuliers et nombreux. La création d'un outil puissant de gestion et de traitement des faits analytiques (l'ordinateur), conjointement à des méthodes de synthèse incluant une Intelligence Artificielle explicite, rend aujourd'hui possible la pratique de démarches intégrantes. Ceci était indispensable à l'écologie, science globale. Mais ces démarches, manipulant des millions de données analytiques vers des synthèses complexes, interdisent le discours approximatif, les techniques douteuses, les spéculations non testables, bref, les malpratiques qu'une écologie dans les limbes a engendrées.

Que le naturaliste du XIXème siècle ait dû audacieusement extrapoler par la pensée des données et des conclusions très approximatives, était la seule méthode possible ; que l'écologue "moderne" emploie de telles démarches, même avec les outils récents, devient une aberration.

Il faut changer notre façon de travailler en ne conciliant pas, car ne s'opposent plus rigueur analytique et concepts précis d'une part, et ampleur synthétique d'autre part. Pour asseoir, ou améliorer cette façon de faire indispensable, non seulement à l'écologie elle-même, mais à ses applications en agronomie, environnement, industrie, aménagement, etc... il faut accepter une connaissance précise d'un minimum de concepts, d'une démarche méthodique élémentaire, d'interprétation exacte, de problèmes clairement énoncés... et renoncer à nombre de facilités (modes, élucubrations, théories spéculatives, expériences sans liens au concret, ...).

Si aujourd'hui il y a effectivement la possibilité technique de développer l'écologie, force est de constater que son emploi, en science fondamentale et appliquée reste essentiellement à mettre en oeuvre, (l'est que l'"écologie" est une science faite par des hommes et que ceux-ci ont une certaine inertie intellectuelle : il faut déranger par la novation une résistance épistémologique.

L'"écologie" est pénétrée par des démarches pseudo-scientifiques. Les naturalistes, observateurs de "l'évidence" et du "bon sens", tenant un discours anthropocentrique à plus d'un égard (culturel, technique, économique et positionnel), traduisent une certaine vision de notre environnement. Ce discours, pas nécessairement faux, porte sur l'observation d'un "trop complexe" pour être précisément décrit, et développe une rhétorique socialement efficace mais scientifiquement obscure. Dans un jugement bref, mais révélateur, B. THUILLIER (1985), traitant de la sociologie des connaissances, qualifie le statut de l'écologie de < < spectaculaire et confus > >.

La démarche scientifique doit clarifier la situation précédente, en écartant certains discours naturalistes et en créant un fondement objectif à l'écologie. Mais même sous la bannière "science", il peut y avoir laxisme, parfois en raison des limites des techniques et des connaissances (= "c'est le seul choix possible"). Une compensation de l'inexact se fuit alors par un habillage pseudo-rigoureux allant des statistiques paramétriques appliquées à une fraction minime d'un événement non compris, à la modélisation spéculative évoquant des théories grandioses et mettant en oeuvre des logiciels complexes où l'ordinateur joue un rôle magique sur de l'abstrait. Ce scientisme tend à conserver des pratiques révolues parce que réhabillées des oripeaux de "sciences modernes".

Conserver comme dogme des pratiques qui ont eu parfois un mérite provisoire, mais qui n'ont plus que la propriété d'être largement "admises", fort "enseignées", ou d'être "majoritaires" ne peut que retarder le progrès scientifique. La remise en cause de ces dogmes devra tôt ou tard s'imposer : il ne suffit pas de s'inscrire dans une mode intellectuelle pour asseoir la valeur scientifique des travaux.

Cette situation n'est pas propre à l'écologie ; beaucoup de sciences souffrent d'un certain conservatisme. Ceci est (ou a été) le cas dans de nombreuses disciplines. Intéressé personnellement par la géologie -qui nous fournit le "support" de la biosphère - je ne ferais que rappeler l'extraordinaire occultation de la majorité de la communauté scientifique des "sciences de la terre" lors de la proposition, essentiellement correcte, de la dérive des continents par WEGENER (1921). On y retrouve les mêmes critères qu'en écologie : dominance des confort de spécialistes de disciplines parcellisées cohérentes dans leur propre champ d'investigation, à l'exception... de la Nature (<•/•. ALLEGRE, 1983).

Reconnaissons toutefois que l'absence d'une cohérence scientifique dans le domaine de l'écologie et l'étendue de son domaine, favorisent les survies : un physicien ne connaissant que la physique newtonnienne doit être rare aujourd'hui alors que les "naturalismes" sont omniprésents en "écologie" fondamentale et appliquée.

L'écologie n'a pas encore produit ses synthèses, méthodes et outils fondamentaux susceptibles d'applications ; dès lors l'empirisme des techniciens supplée à cette carence. L'écologie *per se* ne se présente encore que comme l'accumulation de faits disparates susceptibles de développements fondamentaux ou/et applications ponctuelles mais non comme une approche cohérente globale et monodisciplinaire. L'ouvrage débutera donc par l'exposé des moyens de clarification conceptuelle indispensables. (Quelques dizaines de mots seront employés avec rigueur, de façon univoque ; ils sont définis précisément dans les paragraphes développant leur concept (voir le lexique indexé). Comme ils constituent un vocabulaire minimal d'écologie opérationnelle ils seront imprimés en helvética pour souligner leur caractère univoque, lorsque celui-ci n'est pas déjà acquis dans la langue scientifique usuel (personne ne confond par exemple le concept "espace").

Il existe une multitude de points de vue spécialisés, individuellement souvent pertinents, mais ne touchant qu'un aspect de l'écologie. Cette carence d'une synthèse a des causes historiques ; elle est notamment due à l'absence d'outils de synthèse. Cette absence est aujourd'hui levée (ou en cours de solution) grâce aux progrès de l'informatique et de ses applications permettant d'aboutir à une Intelligence Artificielle de la Nature (y compris les actes humains).

Cette carence historique a multiplié les malentendus sur le contenu de l'écologie et les maladresses sur les pratiques de celle-ci. Il y a donc priorité à restituer l'écologie en rendant possible cette synthèse par une élaboration rigoureuse et logique des connaissances. Sans cette élaboration les outils de synthèse sont inopérants. Il ne peut y avoir Intelligence Artificielle sur un sujet sans avoir au préalable une intelligence naturelle de celui-ci.

L'existence même de ces possibilités inverse la responsabilité de l'écologue. Longtemps condamné à des analyses parcellisées d'une part infime du domaine écologique, il a dû compenser l'absence de synthèse scientifique (— totalement explicite et criticable) par de volumineux traités-discours sur l'écologie. Depuis très peu, nanti d'outils de synthèse, il est confronté aux limites de ses aptitudes analytico-synthétiques (focalisées niais intégrables) pour étudier les systèmes écologiques dans une synthèse scientifique unitaire.

(les propos ne sont pas de simples "paroles verbales" : il y a une réelle difficulté à ré-évaluer l'écologie qui par ailleurs - et c'est normal dans ce contexte - traverse une crise d'identité.

Nécessité sociale, elle a fonctionné "à crédit" ces dernières années, mais n'a pu répondre qu'à des objectifs partiels. Elle reste indispensable mais doit devenir opérationnelle car ce crédit s'épuise. On demande des comptes à la recherche dont le coût financier croît. La société ne comprend pas les erreurs techniques et leur fréquence alors qu'une écologie élaborée et enseignée devrait contribuer à les prévenir ou à les limiter. C'est l'émergence d'une écologie unique, et non d'un agrégat de disciplines disparates qui doit être promue. C'est une connaissance opérationnelle, c'est-à-dire disponible, scientifiquement et techniquement criticable, qui doit être élaborée. L'existence d'outils d'intégration et l'urgence des besoins qui ont précédé les moyens, ne permettent pas de différer ou d'éluder cette inversion des responsabilités : l'écologue se doit de développer une science opérat ionnelle.

Pour cela, il dispose depuis quelques années, d'une technique - l'informatique - permettant des accès logiques, ceux de la mathématique, ou plus pragmatiques, ceux de l'intelligence Artificielle, permettant l'abord des systèmes complexes. Or l'écologie, science globale, se doit d'être, à la fois objective vis-à-vis de ses objets d'étude complexes, et à la fois rigoureuse, c'est-à-dire focalisée sur des spécialisations précises et explicites. De la période pré-informatique, où les interprétations rigoureuses ne s'appliquaient qu'à des objets restreints, nous avons conservé l'interprétation simple des relations cause-effet entre deux variables. Celle-ci reste de nos jours largement le pilier de la démonstration technique et scientifique, ce qui est anachronique et illustre notre impuissance face à un réel toujours complexe.

Pendant la période d'informatique classique, nous avons acquis l'aptitude d'enregistrer les données sur des supports informatiques, d'abord cartes perforées, puis supports magnétiques, et appris à mettre en oeuvre des systèmes de traitements algorithmiques de plus en plus efficaces pour interpréter chaque étude particulière. C'est la constitution des fichiers informatiques traités par dossiers successifs avec l'aide (éventuelle) d'un biométricien. C'est l'approche séquentielle de spécialistes avec des outils sélectionnés au coup par coup, c'est aussi, grâce à cette efficacité la publication massive de résultats, de théories, de modèles spéculatifs ; c'est la marée blanche d'une surproduction de documents illisibles, non pas techniquement, mais par saturation du temps des spécialistes incapables de saisir pleinement les résultats publiés dans leur propre spécialité.

Avec l'informatique moderne l'écologue dispose, outre d'algorithmes encore plus efficaces et opérationnels, de la possibilité intelligente de gérer rapidement données, concepts et hypothèses sous-jacentes grâce à l'adjonction, effectivement efficace des heuristiques. C'est l'abandon des fichiers, des dossiers de consultation informatique, des approches séquentielles - c'est la possibilité longtemps prématurément évoquée en écologie, d'études réellement (et non spéculativement) intégrées.

L'informatique classique a bouleversé notre pratique en obligeant à structurer l'information. L'informatique moderne bouleverse de même en obligeant à formuler rigoureusement notre façon d'énoncer nos connaissances avec abandon des jargons pour permettre l'intelligibilité transdisciplinaire.

Le fait de disposer d'un outil adéquat à l'objet même de l'écologie, science globale, inverse les responsabilités. Avant l'écologue était inefficace par carence d'outil de synthèse ; aujourd'hui l'écologue est inefficace par carence de prise de conscience, donc d'organisation de l'écologie, en fonction de cette situation. Cet ouvrage essaie modestement de contribuer à cette prise de conscience pour aider à la création d'une écologie opérationnelle, nécessairement assistée par ordinateur.

Dans la mouvance actuelle ce travail ne peut être qu'une contribution, que l'auteur espère utile, car il y a urgence. Ce n'est pas par les palliatifs du discours, ni par des études expérimentales trop restrictives, ni par des théorisations grandioses incontrôlables, ni par des objectifs inaccessibles ou par l'usage d'outils inadéquats que l'on résoudra les difficultés actuelles. La perle annuelle de l'équivalent de la Belgique en terres cultivables, la pollution croissante en substances cancérogènes ou mutagènes s'accumulant dans les sols, la disparition de pans entiers de la biosphère dont nous dépendons ne sont pas des cris d'alarme mais des faits auxquels nous nous accoutumons... et auxquels nous prétendons répondre par des palliatifs ponctuels et dissociés, eux-mêmes sources de désordres. Il y a urgence de fonder solidement la science permettant aux techniques en usage dans notre biosphère d'être pleinement profitables à l'homme. Les palliatifs peuvent masquer temporairement les problèmes mais les connaissances solides, décrites par un langage rigoureux et appliquées par des techniques fiables sont les réponses nécessaires au "besoin écologique".

Ce livre pourra donner parfois l'impression d'être abstrait, alors qu'il concerne une science du concret. C'est à la fois sa difficulté et, j'espère, son intérêt. Les autres ouvrages d'écologie que j'ai été amené à consulter tendent à généraliser, à formaliser, à partir d'un domaine particulier, souvent biologique, parfois environnemental. Même une généralisation aussi grandiose que la notion de "flux d'éléments dans l'écosystème" est clairement entachée d'imprécisions conceptuelles et il s'en suit, en usage général, des difficultés comportant des malentendus. Quel que soit mon effort, il est certain que cet ouvrage portera les stigmates de mes particularismes quoique je me sois efforcé de tendre au général.

'fendre au général, pourquoi faire ? D'abord pour dominer le complexe : si une notion générale s'applique à un grand nombre, idéalement à tous les objets d'étude, elle a un pouvoir de synthèse important. Or nous pêchons par carence de synthèse. La synthèse permet d'extraire du fatras de notions particulières quelques concepts généraux qui ordonnent les cas analytiques. Si les exemples de cet ouvrage seront volontairement surtout des cas familiers à l'auteur, les développements cherchent à traiter d'une seule écologie.

Cet essai de clarification devra évidemment être poursuivi tant le désordre est grand. Mais il est une absolue nécessité technique : actuellement, et pas seulement en écologie, la saturation de l'information scientifique est telle que le chercheur, surtout fondamental, tend à travailler pour lui-même. Débordé par la marée blanche des

publications et rapports portant sur des données disparates, référées avec des termes homonymes ou synonymes, la synthèse, ou même la simple vision d'ensemble tend à être impossible.

La pré-éminence d'études réductionnistes, se justifiant dans des disciplines chaque jour plus parcellisées, est à la Ibis un refuge commode et la cause de cette situation. Le scientifique du complexe qu'est l'écologue, doit réagir par une clarification conceptuelle, même si elle est "abstraite" par rapport à certains discours naturalistes et à une demande sociale diffuse. Il ne s'agit pas d'adopter *a priori* des démarches "simplificatrices", qui mènent à la confusion, mais d'obtenir une maîtrise globale des données acquises et d'en déduire les interprétations les plus pertinentes.

Cela exige la rigueur.

RIGUEUR d'abord dans la définition de la discipline elle-même, où l'auteur n'innove pas, mais se conforme aussi strictement qu'il le peut à la définition originale, évitant ainsi le spectacle fréquent des "écologies" contradictoires d'auteurs galvaudant le terme écologie.

RIGUEUR ensuite en s'efforçant de relier les éléments de cette discipline par des liens logiques peu nombreux et une terminologie précise et univoque, indispensable si l'on veut que le vaste domaine de cette science soit effectivement couvert, maîtrisé et utilisable.

RIGUEUR enfin impliquant un effort d'abstraction généralisatrice inhabituelle à nombre de naturalistes, de biologistes, de chercheurs, ou d'enseignants contribuant à la discipline.

On ne peut pas prétendre maîtriser le complexe et tenir un discours obscur, avec une terminologie vague, avec des techniques approximatives et des raisonnements incohérents. Ou bien l'on discourt sur la nature, avec des opinions toutes faites, sans le fondement méthodologique des sciences exactes (possibilité de réfuter), ou bien l'on travaille avec rigueur. Le flou conceptuel, et son corollaire, le laxisme lexical, constituent la principale barrière à l'élaboration scientifique, donc méthodologique, de l'écologie qui à l'échelle de l'homme n'est ni microscopique ni macroscopique mais proximale. Cette élaboration rigoureuse bouscule nos pratiques mystiques, téléologiques et a-scientifiques coutumières mais affranchira seule l'écologie des scories qui encombrant conceptuellement son objet d'étude. Il faudra beaucoup de pugnacité dans la rigueur pour y parvenir et cet ouvrage ne peut être à cet égard qu'une tentative.

Je n'ignore pas que la rigueur est déplaisante ; elle peut se confondre dans l'esprit de beaucoup avec un sectarisme pénible ou une rigidité. Elle est aujourd'hui indispensable en écologie. Ou l'écologie sera ce qu'elle a été définie -une science- et sera rigoureuse, ou elle ne sera rien d'autre qu'une banière confuse pour amalgamer les intérêts divergents de médiocres "scientifiques", "techniciens", voire politiciens.

La RIGUEUR à tous les stades d'acquisition est le fondement de la crédibilité de l'écologie.

Cet ouvrage est aussi un essai.

Qui peut prétendre couvrir avec pertinence et certitude un domaine aussi vaste que l'écologie ?

Qui peut prétendre surmonter d'emblée les très réels obstacles, tant sémantiques que logiques, d'une discipline qui reste très largement à élaborer ?

Tout au plus, cet essai s'efforce de démontrer que l'écologie est une science opérationnelle, totalement opérationnelle intrinsèquement. Quels que soient les problèmes au plan théorique (il y en a peu), il y a urgence sur le plan pratique. Cette écologie pratique est très mal mise en oeuvre.

Ces limites justifient aussi des choix délibérés dans la forme et le contenu de l'ouvrage qui pourraient être, en d'autres circonstances, contestés à juste titre car :

- il ne reflète *a priori* aucune école, aucune tendance, si ce n'est celle de ceux, et il y en a, qui ont recherché l'indispensable rigueur et que l'auteur a pu connaître directement ou par leurs écrits,
- il n'est pas destiné à tous ceux qui, mal accoutumés à la rigueur scientifique, pratiquent dans les techniques ou les sciences l'art du flou et de l'approximatif,
- il est, par rapport aux modes et aux amalgames divergents et contradictoires de l'écologie" (au sens vague si fréquent), à contre-courant et ne cherche à aucun moment une approbation par flagornerie,
- dans une science du complexe, il a été construit, en donnant primauté, si possible, à la clarté et ne recadre éventuellement qu'*a posteriori* les éléments historiques. Quel que soit le mérite de nombreux devanciers, leurs tâtonnements, traduisant les difficultés de leur époque, ne seront pas évoqués car nous devons présentement asseoir solidement et explicitement une science avant de décrire les étapes de l'histoire qui ont conduit à cet état. Il ne s'agit pas ici de reconnaître les mérites, les participations partielles, obscures ou plus évidentes de tels ou tels auteurs ayant contribué à l'état actuel de la discipline, mais d'abord d'affirmer son existence, sa cohérence et de fournir un outil opérationnel à ceux qui, de toute façon, en ont besoin,
- il ouvre nécessairement sur les autres sciences exactes, l'informatique et la mathématique, mais n'est en aucun cas un exposé relatif à ces matières,
- il n'est pas une compilation visant à satisfaire un quelconque programme d'enseignement, ni ne cherche à donner une couverture totale ou partielle de l'écologie fondamentale ou appliquée,
- il n'est pas une narration décrivant les divers états des systèmes écologiques : biomes, écosystèmes, populations, types de sol, de climats, de topographie ou de paysages ; d'excellents ouvrages traitent de ces sujets. Il vise à les compléter en s'efforçant de passer de l'écologie événementielle à l'écologie opérationnelle,
- il s'efforcera par contre beaucoup plus de porter sur la phénoménologie qui fondamentalement explique les états et variations d'état des systèmes écologiques, en dégageant les propriétés déterminantes ayant des conséquences pratiques pour le progrès de nos connaissances écologiques et pour leurs utilisations,
- essai, il ne prétend pas présenter toutes les contributions à l'écologie et celles qui sont citées ne peuvent en aucun cas être considérées comme importantes par rapport à d'autres, ignorées de l'auteur, ou écartées plus ou moins intentionnellement en raison de la masse pléthorique des travaux généraux ou spécialisés du domaine.

Ni compilation sur un domaine particulier, ni satisfaction d'un programme académique, ni exposé d'une école, mais essai pour donner à l'écologie des outils opérationnels, cet ouvrage n'a pas été rédigé pour plaire à qui que ce soit, y compris à l'auteur qui, chemin faisant, a dû remettre en cause nombre de ses malpratiques et n'en a sûrement pas fini.

Cet ouvrage a été divisé en 3 parties.

La première partie traite fondamentalement de la nature des systèmes écologiques en exposant un minimum de concepts indispensables à une écologie opérationnelle générale.

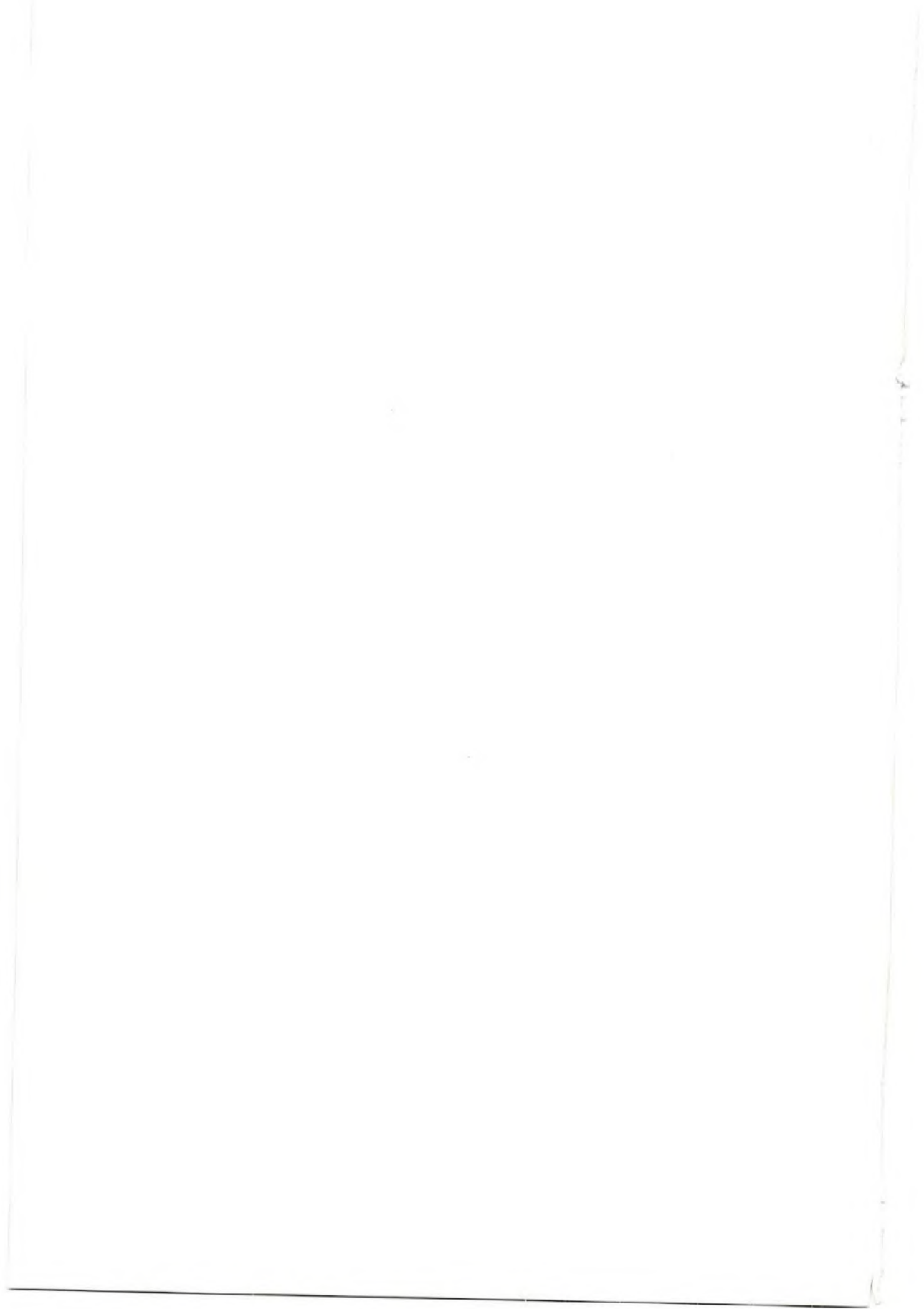
La deuxième partie traite des modalités pratiques d'acquisition, de conservation, d'interprétation et d'optimisation de l'usage des données et connaissances écologiques.

La troisième partie traite des conséquences appliquées que permettrait la mise en oeuvre systématique d'une écologie opérationnelle.

REMERCIEMENTS

Rendre l'écologie opérationnelle est le but collectif de la communauté des écologues. Depuis 25 ans que je participe à cet essai, bien des discussions, des publications et des contacts humains ont nourri ma réflexion autour d'une thématique plus spécialisée. Je dois particulièrement remercier ceux qui, comme D.E. REICHLE, J. LECLERCQ ou V. HUHTA, m'ont permis de pratiquer l'écologie hors du contexte national, mais aussi ceux qui ont engagé de fructueuses réflexions dans le cadre de recherches interdisciplinaires du PBI, du groupe Casimir ou de travaux coopératifs. Je ne peux nominalement remercier bien des membres de la communauté des écologues qui savent l'importance de leur contribution à ce travail. Je dois toutefois une mention spéciale à ceux qui, membre de l'équipe de recherche, ont apporté à travers leurs discussions bien des aliments à la réflexion de cet ouvrage. Cela recouvre des influences très diverses allant des séminaires organisés par M. LAMUTTE à l'Ecole Normale Supérieure, à l'introduction à une informatique encore balbutiante que je dois à R. TOMASSONE et J. Badia, aux discussions sur la modélisation ou à l'approche transdisciplinaire notamment avec J.P. CANCELA DA FONSECA, R.H. GARDNER, m. GOUNOT, g. RICOU, ... C'est évidemment le cas des chercheurs en thèse mais aussi celui de Régine ALAGA et Patricio SOTO sans lesquels cette approche et cet ouvrage n'aurait pu voir le jour : la pratique de l'écologie opérationnelle est nécessairement issue du travail d'équipe. La plupart des illustrations sont dues au talent de D. LAIOMBE. Ma gratitude va aussi à ceux qui ont accepté la difficile tâche de critiquer la forme et le fond de l'ouvrage : Dominique GILLON, Jacques CORTEZ, Francesco DI CASTILL, Philippe GRANVAL, Maurice ROUX et François TOUTAIN ; leurs aimables remarques ont fort amélioré ce travail.

Montpellier, décembre 1989



PREMIERE PARTIE

LES FONDEMENTS

Les connaissances fondamentales nécessaires à l'écologie ne procèdent pas seulement de la mathématique et des sciences exactes de la nature (physique, chimie, géologie, climatologie et biologie), mais aussi d'une inversion de perspectives. Usuellement, l'attention est d'abord focalisée sur les concepts de chaque discipline prise isolément puis, éventuellement, un éclairage écologique est additionnellement superposé à ceux-ci.

A l'inverse, il s'agit ici de partir d'une conception unitaire de l'écologie, puis d'intégrer les connaissances fondamentales indispensables à l'écologue, même si cet exposé se spécialise ensuite nécessairement dans un domaine plus restreint (où, par exemple, un approfondissement de la chimie sera nécessaire). Ces fondements seront exposés en introduisant, depuis la définition originale de l'écologie, d'indispensables notions générales (Chapitre I), puis en décrivant l'essentiel des structures fonctionnelles biophysicochimiques de l'écosphère (Chapitre II), enfin la situation des éléments biologiques dans les systèmes écologiques sera restituée (chapitre III). Ces "fondements" permettront d'aborder ultérieurement la partie centrale de l'ouvrage consacrée à l'élaboration de l'écologie (2ème partie). La qualité de cette élaboration scientifique ouvrant elle-même aux développements techniques et culturels (3ème partie).

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS GENERALES

1.1. Clarification conceptuelle

Comme toute science, l'écologie a un objet d'étude général et des domaines particuliers impliquant des méthodes, des procédés, des techniques, des observations de faits, une reconstitution synthétique, etc. Ceci implique un langage associé à ces opérations, les mots recouvrant des concepts traduits par une définition plus ou moins précise.

Nous avons vu, dans l'avertissement, que la genèse de l'écologie moderne s'est faite assez brutalement, à partir de bribes issues d'autres disciplines et fort peu à partir d'un corpus initial dûment enregistré, défini et enseigné. La nécessité a conduit les premières personnes associées à ce réveil de l'écologie à se forger leur langage personnel, plus ou moins précis selon le degré de rigueur où se plaçait cette démarche personnelle.

La difficulté provient du fait que ces langages personnels, parfois puisés à des sources sérieuses, sont très souvent incompatibles les uns avec les autres. Dès que l'on veut échanger, on constate que les termes utilisés sont employés avec des sens différents et encore plus avec des précisions très variables. Le mot écologie lui-même, dans la bouche d'un politicien, revêt une signification générale inadéquate avec la définition du mot. Ces incohérences et ce flou sont certes issus du caractère initialement hétéroclite des intervenants en écologie, mais aussi d'un certain défaut de rigueur issue de l'énormité du champ couvert par cette science. L'absence de réflexion et de connaissances était, et est encore, telle qu'une position rigoureuse ne pouvait se dégager : il n'est pas facile de construire sur et avec des sables mouvants.

Les défauts sémantiques proviennent aussi d'une nécessité sociale entre chercheurs s'unissant pour tendre à une cohérence ; dans un premier temps, cela conduit à masquer, sous des vocables flous, l'hétérogénéité initiale des concepts pour ne pas soulever à tout instant trop de questions. Enfin, à quoi sert-il de définir avec rigueur un élément quelconque dont on sait que les techniques d'études ou les moyens financiers ou humains disponibles ne permettent pas la mesure ou l'observation précise ? Les difficultés techniques initiales ont, d'une certaine façon, "justifié" un certain laxisme lexical.

Mais cette situation se retourne : faute de concepts précis, les échanges sont mauvais, les informations creuses ou lourdes (il faut tout décrire à nouveau dans le détail). Pire, une énergie importante est perdue à s'expliquer, voire à controvertir, car chacun est attaché à son langage, justifié ou non. Ce défaut, inévitable par la nature même de la genèse de l'écologie, se trouve enfin amplifié par la retransmission (articles, livres, écoles scientifiques) effectuée nécessairement en utilisant telle ou telle acception particulière qui fait croire, par exemple à l'étudiant, qu'elle est correcte.

Correcte, oui, mais par rapport à quoi ? Les avis sont partagés, divers, et chaque scientifique a une opinion à la fois nuancée et particulière. Il sera volontiers

exigeant pour un mot, dont il a l'usage, et inattentif au sens d'un autre terme, important mais externe à sa pratique.

Si l'objet de l'écologie est, nous allons le voir (p. 20) global, l'écologue est un spécialiste. A moins d'une ignorance profonde de cette situation ou d'une fatuité extrême, l'écologue ne peut écarter un effort sémantique de généralisation et d'intégration de ses résultats à l'ensemble auquel il contribue. Il se doit de dépasser le jargon forgé dans le domaine étroit, paroissial, qu'il aborde concrètement et ne peut rejeter, dans une opprobre systématique, la recherche d'un cadre logique exprimé et défini clairement et où s'inscrit sa contribution à l'écologie. Ce point sera repris après une définition plus précise de l'écologie au paragraphe 1.2.1.

<<...il serait à désirer que les écologues fassent un effort particulier pour simplifier et épurer leur langage scientifique en éliminant l'inutile obstacle d'une terminologie obscure qui les caractérise souvent. Il faudrait aussi qu'ils montrent plus de rigueur dans la formulation de leurs hypothèses de travail, dont les termes devraient être compréhensibles pour n'importe quel profane, ce qui est parfois une preuve de la valeur d'une hypothèse>> (Di CASTR1, 1984).

Comme nous avons besoin d'un langage commun rigoureux, si nous voulons progresser, comme les points de vue divergent souvent, j'ai opté délibérément là où, me semble-t-il la confusion est la plus grande, pour l'application d'une règle de priorité, en citant la source. La définition originale (lorsqu'elle existe !) sera toujours privilégiée. Lorsqu'elle n'existe pas à la connaissance de l'auteur, c'est le premier équivalent qui sera utilisé ; si enfin un consensus semble exister sur un concept désigné par un mot, je le définis sans plus. En aucun cas les discussions sémantico-conceptuello-théoriques sur la diversité des mauvais usages des termes et des opinions d'auteurs ne seront développées. Le jeu consistant à définir sur l'obscur des concepts imprécis pour critiquer des démarches irréfutables sera, autant que faire se peut, évité malgré son importance dans la littérature "écologique".

Enfin, les progrès des connaissances et de la rigueur obligent à l'adoption de néologismes, dont le nombre sera réduit au maximum. L'écologie est dotée d'un vocabulaire foisonnant, désordonné dont il existe de bons glossaires. En raison de l'isolement initial des disciplines concourant à l'écologie, les concepts usuels sont souvent quelque peu redondants, assez souvent eux-mêmes mal définis. Beaucoup sont inutiles et cependant, cette science évoluant, certains néologismes sont indispensables pour les novations.

Dans certains cas, heureusement limités (données, écologie, compétition, intrapolation, prélevât...), la définition devra être abstraite. Dans ces cas, il est très important que l'écologue (qui est souvent un familier des faits concrets) fasse l'effort de comprendre ces abstractions : elles sont indispensables pour permettre d'atteindre aux concepts généraux de l'écologie.

Comme souligné dès l'avertissement, un certain nombre de termes recevront dans cet ouvrage une définition univoque qui sera donnée au fur et à mesure du développement. Ces termes ont été choisis en fonction de leur pré-existence (pour minimiser les néologismes), de leur univocité dans les disciplines et techniques (géologie, informatique, botanique, logique, agriculture, ...) concourant à l'écologie, ou de leur non interférence avec les diverses compréhensions dans ces disciplines (p. 28). Tout au long de cet ouvrage les mots à signification écologique univoque, définis précisément dans le texte sont indiqués en caractère helvetica. Si ces termes univoques étaient définis dès leur premier usage, l'exposé nécessairement linéaire serait haché ; ils seront parfois utilisés avant leur définition formelle mais pourront être rigoureusement compris grâce à l'index (p. 564). Enfin, certains termes à signification univoque essentielle en écologie mais couramment acceptés sans ambiguïté, tel le concept d'espace, ne seront pas distingués en helvetica ; cela est inutile.

1.2. L'écologie et les disciplines connexes

1.2.1. L'écologie

<<Unter Oecologie verstehen wir die gesammte Wissenschaft von den Beziehungen des Organismus zur umgebenden Aussenwelt, woliin wir im weiteren Sinne aile "Existenz-Bedingungen" rechnen können> > (HAECKEL, 1866b).

qu'on peut traduire par :

<<Nous entendons par ECOLOGIE la science globale des relations des organismes avec leur monde extérieur environnant dans lequel nous incluons, au sens large, toutes les conditions d'existence> > (trad. BOUCHE, 1980a).

Cette définition mérite une lecture attentive, le mot écologie ayant souvent été utilisé sans références sérieuses, ou pire avec des références erronées qui doivent être écartées. Pour cela, il faut clairement analyser chaque propriété de la définition et en déduire ce qui est dans et hors le domaine de cette discipline.

1) L'écologie est une science. HAECKEL utilise dans ces nombreux travaux ce mot (Wissenschaft) au sens précis, moderne, de science exacte. L'écologie devra donc dans ses démarches suivre les méthodes des sciences exactes. *A contrario*, elle ne saurait couvrir des domaines techniques, philosophiques ou politiques, même si elle peut contribuer à l'élaboration de (ou influencer) ces domaines.

2) Cette science a trait aux organismes pris individuellement ou dans leur ensemble. Elle se réfère donc, entre autre, à un individu ou à la somme de tous les individus. Par contre, elle ne concerne pas directement les propriétés internes des organismes (régulation physiologique interne, histologie, etc.). Si l'écologie peut évidemment utiliser les connaissances acquises sur ces propriétés, celles-ci ne sont pas son objet d'étude.

3) L'écologie étudie les relations des organismes vivants avec leur monde extérieur environnant (= leur milieu, p. 31). 11 y a symétrie. L'écologie porte autant sur l'étude des organismes que sur le milieu de ces organismes, c'est-à-dire les autres organismes et les éléments physicochimiques non vivants : l'écologie n'est donc pas qu'une science biologique mais a trait aussi à d'autres objets analysés par certaines disciplines (minéralogie, climatologie, pédologie, géologie, hydrologie, etc.).

4) L'écologie étudie les relations des organismes vivants avec leur milieu... y compris toutes les conditions d'existence. Une étude écologique référera donc ses travaux aux conditions qui ont prévalu dans la formation d'un organisme (paléo-écologie) ou qui permettent son maintien actuel. Toute étude écologique devra donc restituer directement, ou se référer explicitement et de façon démonstrative au milieu permettant toutes les conditions d'existence de l'organisme. Des recherches ne respectant pas cette exigence (notamment celles s'effectuant en plaçant un organisme dans un environnement arbitraire) ne relèvent pas de l'écologie.

5) L'écologie, étant une science globale (gesammte Wissenschaft) porte d'abord sur l'ensemble des conditions d'existence. L'écologie ne peut évidemment pas refuser les informations apportées par des données analytiques mais celles-ci n'ont de valeur que si elles restent (ou peuvent être restituées) dans un cadre général et cohérent. Toute démarche analytique en écologie se fait pour une conclusion synthétique. Une approche exclusivement réductionniste ne peut être écologique.

6) Organisme(s) et milieu sont envisagés globalement dans leurs relations (à actions réciproques). Nous sommes en présence d'un ensemble d'éléments dépendant les uns des autres et formant un tout organisé, c'est-à-dire un système. Ce dernier point n'est pas, pour des raisons historiques, explicite dans la définition mais découle de ses propriétés puisque au moins deux compartiments (organisme(s) + milieu(x)) et leurs relations en découlent explicitement.

En conclusion, l'écologie, de par sa définition originale, est une science visant à une compréhension générale, intégrée, "totale" des relations de tout organisme ou groupe d'organismes avec l'ensemble des éléments environnant ceux-ci. L'écologie

étudiera autant ces éléments environnants que les organismes et de telle sorte que ses résultats, ses démarches s'appliquent à des relations ayant prévalu et prévalant dans l'édification de ces rapports. Une telle approche ne peut se faire en s'interdisant une synthèse cohérente des éléments étudiés. Le choix d'observations ou de démarches que l'on ne sait synthétiser est exclu.

Une telle exclusion opérationnelle, hors écologie, ne retire évidemment pas aux autres démarches leurs contributions au développement des connaissances. Il est d'autre part évident que certaines études propres à des disciplines telles que la géologie, la botanique, la pédologie, la zoologie, la microbiologie, la biochimie, etc. peuvent être ou ne pas être écologiques. Un travail peut être rattaché à deux, trois... disciplines s'il répond simultanément aux définitions et aux exigences méthodologiques de ces disciplines et réciproquement un travail ne répondant pas aux critères de l'écologie n'est pas pour autant un mauvais travail... simplement il ne pourra contribuer qu'indirectement au progrès de celle-ci (fig. 1-1, p. 29).

Le mot écologie ayant été utilisé, parfois popularisé, avec des significations erronées, il y a lieu de bien distinguer également les démarches non scientifiques souvent confondues avec l'écologie par les vulgarisateurs, voire par nombre de scientifiques, non écologues, se piquant d'écologie.

L'écologisme (Simonne, 1979) est un mouvement philosophico-politique développant des thèses publiques a-scientifiques, parfois inspirées de l'écologie, mais également étrangères à celle-ci ; par exemple, discuter d'une option économique et sociale relative aux choix des filières énergétiques (option nucléaire, pétrolière, solaire...) relève d'un vaste domaine où les apports de l'écologie à la "décision" ne peuvent être que mineurs. Les partisans ou militants de l'écologisme sont les écologistes (Simonne, 1979).

L'environique (BOUCHE, 1980a), également dénommée génie écologique ou écotecnologie, est l'ensemble technique mis en oeuvre pour surveiller, gérer, entretenir, voire améliorer notre environnement dépendant de nos activités. Cette technologie, mise en oeuvre par les environiciens, est par essence anthropocentrique ; elle peut également utiliser des connaissances élaborées par - et des techniques développées dans - l'écologie. Toutefois, sa motivation socio-économique est fort différente : elle répond à des jugements distincts de ceux de la démarche scientifique. Ici encore le lien avec l'écologie est parfois inexistant : le choix d'un modèle de dépoussièreur de fumée d'usine utilisera des procédés physicochimiques mais ne mettra rien en oeuvre d'écologique. C'est la raison pour laquelle les termes de génie écologique ou écotecnologique sont inadéquats. L'environique comme d'autres techniques, la médecine, l'agronomie, l'urbanisme, etc. utilise des connaissances écologiques mais aussi bien d'autres connaissances. (Afin d'éviter tout malentendu opérationnel, j'utiliserai le mot milieu pour le < < ungebunden Aussenwelt >> de E. HAECKEL en laissant le terme environnement à sa perception anthropocentrique).

L'écologie en tant que science ne peut être confondue avec les techniques humaines ou avec les démarches philosophico-politiques... ce qui ne signifie pas que l'écologie n'ait pas d'applications importantes. Il est même évident que c'est le sous-développement de l'écologie par rapport aux autres sciences exactes (physique, chimie, biochimie, ...) qui a induit une inculture sur son objet et une inaptitude humaine à apprécier correctement les implications écologiques des techniques agricoles, industrielles, d'aménagement, etc. Des erreurs souvent graves ont été, sont et seront commises. Celles-ci entraînent une réaction sociale diffuse ou organisée par les agents des médias et les partis politiques (dont les militants écologistes), puis une prise en compte par des réponses techniques environneciennes.

Si le scientifique pratiquant au sens exact du terme l'écologie, c'est-à-dire l'écologue, peut suggérer, voire, se transformant en technicien, tenter des applications de ses connaissances au plan technique, et contribuer au travail de

l'agronome, de l'environniste, du médecin, de l'aménageur, de l'urbaniste, il est clair que les options philosophiques et politiques font appel à des aptitudes extra-scientifiques. L'ouvrage portant sur les aspects scientifiques, évoquera cependant quelques applications de l'écologie (cf. 3ème Partie) en laissant éventuellement à l'écologiste le soin de puiser dans ce travail des éléments de réflexion. On peut toujours employer le mot écologie dans un sens fourre-tout, mais ce terme perd alors toute signification précise et n'est plus opérationnel. Tenu compte de l'objectif du livre, c'est *a contrario*, au sens exclusivement précis, car seul opérationnel, qu'il sera employé, même si cette exigence est, par sa rigueur, inhabituelle.

Devant les mauvais usages du mot écologie, certains ont suggéré de le remplacer par un synonyme : à ma connaissance, il n'y en a pas. Le mot bionomie est défini comme : < <partie de la biologie qui a pour objet l'étude des rapports des êtres vivants avec leur milieu et entre eux>> (T.L.F., 1975) texte pratiquement repris dans le dictionnaire Le Grand Robert (GRLF, 1985). Malgré son incohérence logique (biologie-milieu, cf. n° 3, p. 20) et son imprécision opérationnelle (globalité !) on pourrait adopter ce quasi synonyme. Malheureusement le sens de ce mot est depuis longtemps fort différent << Bionomie, s.f. didactique. Science des lois de vie>> (CDAF, 1842) définition reprise exactement récemment dans le "dictionnaire de la langue française" et légèrement élargie << Synonyme inusité de biologie>> (LITTRE, 1976). Suivre une telle proposition reviendrait à abandonner un terme précis et opérationnel pour une expression très large et inusitée : les usages incorrects du mot écologie sont faciles à démasquer face à une définition précise ; ceux de bionomie ne le seront plus.

En fait le mot mésologie serait le synonyme le plus proche du mot écologie. Chronologiquement même sa proposition est antérieure à celle d'HAECKEL !

< <... 3° Sous les rapports de l'organisme avec le milieu dans lequel l'être est plongé. En effet, pour que ce mouvement qui constitue la vie puisse naître ; pour que, étant né, il se puisse maintenir sans déviation, il faut que le corps vivant soit placé dans un milieu en harmonie avec sa constitution. La connaissance des conditions de ce milieu et des influences réciproques que chacun des deux termes exerce l'un sur l'autre, constitue un troisième point de vue, une troisième abstraction par rapport à laquelle devront être étudiées les diverses espèces de la série des êtres : c'est la science des milieux ou MESOLOGIE>> (BERTILLON, 1860).

Ce terme connu dans le monde médical contemporain de BERTILLON comme l'indique LITTRE et ROBIN (1865) n'est toutefois attesté par les ouvrages de lexicologie que de 1873 (BERTILLON, 1873). En effet l'auteur développe, dans ce dernier travail, longuement les formes de mésologie et précise la signification du mot milieu, mais donne une référence erronée de sa première définition ce qui, jusqu'à présent, a obscurci l'usage du terme.

Le terme de mésologie est tout comme écologie introduit comme une science << Biologie ; sciences qui la constituent>> (BERTILLON, 1860), et ne diffère opérationnellement que par le fait que HAECKEL précise son caractère "global" et la nature "au sens le plus large" du milieu extérieur (Aussen-welt).

En définitive, si la pollution sémantique dont souffre présentement le mot "écologie" ne pouvait être corrigée le mot mésologie en constituerait une alternative quasi synonyme.

Toutefois, j'opte pour l'usage préférentiel du mot écologie en raison

- du caractère non ambigu et très opérationnel de sa définition d'origine,
- du caractère très flou du concept initial de milieu qui peut être "anormal" (mésologie pathologique, BERTILLON, 1860),
- de l'usage répandu du terme écologie dans le monde scientifique (sous réserve du respect de la définition de HAECKEL),
- de l'erreur de référence qui nous a privés de 1873 à 1988 de la définition originale de BERTILLON. La mésologie au sens actuel est discutée p. 191.

1.2.2. Histoire naturelle et écologie

Aux XVIIIème et XIXème siècles, à côté de la mathématique, les sciences physiques (chimiques et naturelles), en raison même de leur développement, se sont scindées à partir d'un tronc commun, dans différentes spécialités (physique, chimie, biologie, physiologie, morphologie, géologie, histoire naturelle, ...). L'histoire naturelle jouait un rôle "synthétique", contrairement aux autres disciplines où le développement de techniques analytiques de plus en plus précises permettait de rechercher l'essence même de la matière (physique), des éléments (chimie), des êtres vivants (biologie) dont leur fonctionnement (physiologie)... L'histoire naturelle par la synthèse intellectuelle, par la compilation, la comparaison, le recoupement des faits tenait un discours synthétique où s'opposaient notamment des points de vue divers sur l'origine de la nature (son histoire). Ainsi, tandis que les sciences exactes actuelles et la mathématique se diversifiaient et se distinguaient peu à peu des autres domaines de la connaissance (prise au sens large : théologie, philosophie, économie, éthologie, ...) par une rigueur méthodique, une démarche analytique dominante, une épistémologie de précision croissante, et tandis que la démarche expérimentale s'affirmait, l'histoire naturelle remplaçait ces éléments analytiques contemporains dans un discours historique.

La Science établissait ses fondements épistémologiques et méthodiques les plus sérieux, décrits notamment par Claude BERNARD (1856) souvent cité (mais rarement lu). Tous les écologues sont actuellement confrontés au plan méthodique et épistémologique aux problèmes rencontrés par le grand médecin physiologiste du XIXème siècle. L'histoire naturelle, beaucoup plus générale que ce qui peut être opérationnellement appréhendé, englobe les faits scientifiques en les replaçant nécessairement dans une échelle de temps. C'est donc dans ce contexte que les grands naturalistes s'affronteront entre évolutionnistes, vitalistes, créationistes, etc. Les sciences rigoureuses, dites exactes, se focalisaient sur des observations contemporaines mais leur cohérence introduisait nécessairement le temps, notamment pour interpréter les restes fossiles (LAMARCK, 1799). Ernst HAECKEL (1868, 1874) précise : <<L'HISTOIRE NATURELLE, alors qu'elle envisage "l'histoire de la création naturelle" comme son objet le plus élevé, le plus capital, le plus précieux, se voit obligée de prendre l'idée de création dans le second sens que nous avons indiqué, c'est-à-dire le sens d'origine de la forme des corps>>. Préalablement l'auteur écrit : < <... l'apparition dans la nature d'un nouveau corps, par exemple d'un cristal, d'un champignon, d'un infusoire...> > qui précise ce qu'il entend par "corps" ; HAECKEL indique aussi antérieurement < <Si quelqu'un éprouve le besoin de se figurer l'origine de cette matière comme l'oeuvre d'une activité créatrice surnaturelle, d'une force créatrice existant en dehors de la matière, nous n'avons rien à dire de cela. Nous nous contentons de remarquer, que de cette conception il ne résulte pas le plus mince avantage pour la connaissance scientifique de la nature, cette idée d'une force immatérielle, créant d'abord la matière, est un article de foi, qui n'a rien de commun avec la science humaine : là où commence la foi, la science finit> > qui décrit ce qu'il entend par "second sens" que nous avons cité ci-dessus.

L'histoire naturelle est une reconstruction intellectuelle basée sur des faits très difficiles à vérifier, à recouper, à contrôler par une contre-épreuve au sens de Claude BERNARD, surtout à l'époque de HAECKEL. Cet auteur saura généralement, avec quelques grands naturalistes évolutionnistes, utiliser les conditionnels les énoncés au mode hypothétique partout où ces reconstructions de l'esprit, difficilement contrôlables, seront nécessaires mais beaucoup de lecteurs prendront pour acquis ce qui n'est qu'hypothèse. C'est le même HAECKEL qui a défini l'écologie comme science (Wissenschaft) globale (gesamte) alors que l'histoire naturelle "envisage l'histoire de la création naturelle". Quelle différence ! L'écologie est scientifique au plein sens du terme, l'histoire naturelle, dont l'objet est par ailleurs quelque peu différent, n'est largement qu'une construction d'hypothèses : les deux sont des disciplines globales de la nature, mais l'une, l'histoire naturelle, l'embrasse d'emblée, au prix d'hypothèses

grandioses, l'autre, l'écologie, doit suivre la démarche scientifique, sans perdre son objectif de globalité.

Si le naturaliste HAECKEL a à la fois distingué et défini l'écologie mais surtout pratiqué l'histoire naturelle ce n'est pas un hasard. Comme beaucoup d'autres sciences, l'écologie est née au XIXème ; mais s'il y a eu naissance, il n'y a pas eu développement car à la différence de nombreuses nouvelles disciplines, elle est globale et synthétique. En fait, elle se dégage encore aujourd'hui très mal et lentement de l'histoire naturelle.

Tout l'effort des écologues *stricto sensu* a été de donner une assise scientifique à leur domaine. Cet effort eut un succès très inégal. La masse de faits dits écologiques

- se réduit fort si l'on élimine ce qui ne rentre pas dans le domaine de la discipline (organismes dans leur environnement...)

- se réduit encore plus si l'on élimine les interprétations non réfutables, les supputations plus ou moins inconscientes prises pour des faits.

L'un des problèmes fondamentaux de l'écologie au plan méthodologique est de distinguer clairement -à la limite d'opposer- d'une part l'important domaine largement hypothétique du discours naturaliste (sur l'histoire de la création naturelle, sur la cohérence apparente des états observés synthétisés par des modèles simulant une réalité inaccessible présentement, en passant notamment par de nombreux raisonnements circulaires) et d'autre part, la partie observée ou observable, mesurée ou mesurable, vérifiable, étape par étape, qui relève de l'écologie. Si les fresques naturalistes sont fort attrayantes pour le grand public ou pour une pédagogie enfantine, les acquis écologiques souvent restent fort limités.

L'histoire naturelle peut constituer le cadre d'hypothèses utiles à l'écologie. Toutefois l'ampleur du discours naturaliste s'oppose à la minceur et à la rigueur de l'exposé scientifique écologique... d'où la facilité du dérapage du second au premier, d'où l'envahissement du premier dans le second... ce qui freine considérablement l'essor de l'écologie en en faisant une pratique une nébuleuse semi-scientifique où le tri du solide et de l'hypothétique reste souvent à faire.

Nous nous devons, pour un temps, à un exercice de rigueur pour dégager l'écologie de sa gangue naturaliste, pour asseoir cette science. Après ce salutaire "dépoussiérage", il faudra tenir compte du contexte souvent stimulant de l'histoire naturelle : distinguer impérativement n'est pas rejeter définitivement.

1.2.3. Ecologie et réfutabilité

Science globale, l'écologie embrasse, à tous les niveaux d'observations, les processus des relations des organismes avec leur milieu. Cet objet d'étude étendu, d'une grande complexité, est observable en l'état actuel : au présent. Mais il ne surgit pas *ex nihilo* ; il est issu d'une évolution, c'est-à-dire d'un effet du temps au cours duquel la situation présente s'est constituée. Tendre à comprendre l'état actuel, c'est interpréter le passé y conduisant et réciproquement bien connaître l'état actuel, c'est se créer les assises d'une interprétation du passé. De ce point de vue l'écologie interprétative ne peut pas être dissociée des processus historiques (temporels) ayant conduit aux systèmes actuels (p. 91). A condition de ne pas réduire les études sur l'évolution aux seules évolutions biologiques (p. 177), l'écologie étant nécessairement spatiotemporelle, la reconstitution de l'évolution de l'écosphère est une partie de l'écologie car toute relation (p. 20) implique un temps (= une date, au moins).

L'objet d'étude de l'écologie, n'est perçu que par des faits (que nous formaliserons dans leur nature concrète directement au paragraphe 1.7.5.) leur interprétation implique un choix d'hypothèses (p. 40) conduisant à un modèle physique, mathématique et théorique. L'étendue de l'écologie fait que cette approche du global se fait à partir de points de vue et de séries de faits, toujours partiels et incomplets. L'aptitude d'une théorie est dans sa généralisation. C'est la généralité qui

permet d'inférer au global des propriétés observées sur des cas particuliers. <<... la science traite de proposition sur les choses, non des choses elles-mêmes. La théorie scientifique est une carte qui nous permet de nous orienter. Nous lisons la carte et croyons lire ainsi l'ordre du monde. Mais la carte n'est pas le terrain, elle n'est qu'une construction de notre esprit. Rien ne nous garantit que la carte soit exacte, nous pouvons seulement vérifier par des expériences qu'elle nous fournit une description pertinente>> (De PRACONTAL, 1987).

Construire une théorie c'est produire un ensemble de règles systématiquement organisées qui sert de base à une science et donne l'explication d'un grand nombre de faits. La théorie écologique est, comme l'écologie, à l'état de rudiments. Si son besoin est fort ressenti et souvent explicitement exprimé (par exemple : BARBAULT *et al.*, 1980) son élaboration ne pourra s'effectuer qu'après une acquisition de données et une élaboration des informations sur les systèmes écologiques (p. 91) n'excluant pas les composants dominants de ces systèmes (p. 109, 119) et en écartant notamment les effets pervers du biocentrisme (p. 210). Comme l'écologie, sa théorie ne peut être que globale (p. 105).

En l'état actuel toutefois, les interprétations écologiques restreintes tendent à contribuer à cette théorie générale et il est essentiel de rendre réfutables celles-ci (p. 41) et de pratiquer une intégration et un contrôle permanent des connaissances (chap. VII). Une interprétation sera réfutable lorsqu'elle permettra de prédire un (des) résultat(s) vérifiable(s). La réfutabilité d'une interprétation qualifie la possibilité d'un tel contrôle univoque. Ceci est aujourd'hui possible en écologie et constituera la contribution (indirecte) de l'ouvrage à l'élaboration théorique de cette discipline.

Dans cet ouvrage, nous considérons les termes réfutables, vérifiables, validables, contrôlables, testables souvent comme synonymes. De ce point de vue, nous nous en tenons à l'épistémologie de Claude Bernard (1856) qui définissait les faits scientifiques comme se prêtant à contre-épreuve. Pour l'écologie actuellement, il est urgent de distinguer les résultats réfutables de ceux incontrôlables par carence de techniques de vérification, ce qui oblige à classer ces derniers temporairement dans le domaine des supputations (plausibles ou non). Quant à opposer dans la démarche épistémologique, le réfutable (que l'on ne peut réfuter, prouver le faux) au vérifiable (dont on peut montrer le véridique, le vrai) selon K. POPPER (1973), n'est pas initialement primordial ; nous savons que par approximations successives (p. 357), nous tendons vers le plus vrai, ou le moins faux simultanément, mais nous savons surtout, ce qui est plus grave, que certains "faits" sont "admis" dans le domaine écologique par croissance sans que l'on puisse les contrôler. Ces croyances doivent être rejetées dans le domaine des supputations tant que nous ne pourrions pas les contrôler, les vérifier, les réfuter.

Le danger réside beaucoup plus à prendre pour acquis une hypothèse, par un phénomène de croyance sociale de certaines communautés d'écologues ou de praticiens qui glissent peu à peu de la supposition, à la répétition, puis à la croyance sans que celle-ci n'ait jamais été contrôlée *per se*.

Dans toutes disciplines des sciences exactes, les faits ou les interprétations réfutables servent de bases à l'émission d'hypothèses qui devront être ultérieurement testées. La difficulté est qu'en écologie, au sens vulgaire, le bain intellectuel est celui de l'histoire naturelle où il n'est pas d'usage de faire le distinguo entre hypothèses scientifiques, théories fragiles et pures élucubrations.

Plus grave, des "domaines" entiers, dits de l'"écologie" ne sont que constructions invérifiables dans leur genèse mais sont acceptés par un consensus inconscient comme des faits écologiques. Il en est ainsi de modèles spéculatifs (p. 396) qui sont parfois utilisés exclusivement dans certains domaines de l'écologie". La para-écologie (p. 452) (BOUCHE, 1977a) a ainsi probablement un domaine beaucoup plus vaste que celui de l'écologie.

Les résultats de certains modèles spéculatifs (= invérifiables) sont souvent pris au sérieux, en raison de leurs techniques mathématico-informatiques (sans rapport avec l'écologie) et, leurs "résultats" étant obtenus, il est "inutile"

d'entreprendre les études écologiques qui restent pourtant à conduire. Ainsi une simple hypothèse "très plausible" devient un fait acquis.

Notons que vérifier la cohérence d'une interprétation avec les faits n'est pas suffisant ; il faut que cette interprétation soit unique. Sinon nous tombons dans le discours puisant à chaque ré-interprétation les "arguments" *ad hoc* sans aucune réfutabilité (= sans valeur synthétique) (p. 237, chap. VI).

C'est ici que l'interprétation scientifique échappe au discours sur la Nature. A ce stade, nous devons distinguer nettement, mais non opposer, deux étapes.

D'une part, les interprétations conduisant à des prédictions explicites et se prêtant à un contrôle effectif par la confirmation avec de nouvelles données objectives ; ce sont parmi les interprétations les propositions pleinement réfutables.

D'autre part, les explications opportunistes donnant cohérence aux faits, aux approximations et aux croyances ambiantes. Parmi celles-ci, les commentaires cherchent la généralisation beaucoup plus que la réfutabilité, mais ne se contentent toutefois pas d'une simple explication. Les explications *ad hoc* (ou opportunistes) présentent l'avantage de permettre d'embrasser un grand nombre de faits et d'hypothèses annexes, usuellement énoncées en un discours polymorphe ; elles "résistent" aux nouveaux faits, d'autant mieux que leurs critères dénoncés sont flous et facilitent en permanence une ré-écriture. Elles sont souvent la base des "synthèses écologiques" actuelles. D'un point de vue opérationnel, les commentaires constituent des cadres conceptuels non seulement naturalistes, mais aussi socio-économiques où les divers spécialistes peuvent en première approximation s'entendre avec un langage vague commun ; leur rôle, même ambigu, n'est donc pas négligeable. Dans un deuxième temps, leurs faiblesses sémantiques et conceptuelles apparaissent et révèlent leurs défauts, voire gênent le progrès des connaissances en raison des malentendus qu'elles induisent. Les commentaires n'en constituent pas moins pour autant le cadre des réflexions où s'opèrent les choix de problématiques puis d'objectifs de recherche précis. Ceci leur confère une valeur opérationnelle indirecte.

Très souvent devant la complexité et l'ampleur des hypothèses, l'interprétation est d'abord une tentative de présentation cohérente des faits. Il s'agit de se prêter de façon convaincante, et si possible conforme aux idées admises (incluant une mixture de faits et de dogmes), à une interprétation (e.g. si l'anthère de telle fleur est de telle forme c'est que... grâce à la sélection naturelle I). Cette interprétation est une supputation, parmi d'autres possibles. Il suffit de nouveaux faits contradictoires pour qu'une ré-interprétation opportuniste soit fournie, etc. Ces interprétations *ad hoc*, *a posteriori*, sans prédictions opérationnelles, sont une facilité courante dont les truismes ont été dénoncés maintes fois et sont discutés au paragraphe 3.6.2.

Reconnaissons honnêtement que si les diverses hypothèses possibles étaient énoncées, elles constitueraient souvent un inventaire de lecture insoutenable. Mais symétriquement le choix d'une (ou deux) supputation(s) dans une interprétation relève alors du flair, de l'ambiance culturelle, des "croyances" admises par l'auteur et son environnement intellectuel.

Les propositions objectives pleinement réfutables sont celles fondées sur des données issues de l'objet d'études de l'écologie : l'écosphère. Elles se prêtent à un contrôle sur cette écosphère à partir de nouvelles données acquises par des techniques disponibles. Entre cet idéal et le commentaire, voire la supputation, il y a tout un gradient : 1°) des interprétations objectives (découlant de données objectives) mais à réfutabilité nécessitant le développement de nouvelles techniques, 2°) des interprétations subjectives, découlant de potentialités de l'écosphère, nécessitant des acquisitions objectives de contrôle, voire des développements techniques pour de telles acquisitions, enfin 3°) des constructions intellectuelles stimulant l'imagination.

L'un des efforts essentiels de l'écologie est de réduire les explications opportunistes en présentant des théories cohérentes donnant possibilité, par une prédiction de résultat(s) futur(s) de tester de façon univoque la validité du corpus

théorique ainsi énoncé. C'est sur ce point qu'après Claude BERNARD, mais de façon plus explicite, K. POPPER a insisté sur la réfutabilité. Il ne suffit pas, comme trop souvent en "écologie", d'évoquer des "théories" souvent complexes, il faut opérationnellement que celles-ci se prêtent à une réfutation univoque. Il s'agit de prendre le risque par un énoncé prédictif des conséquences ainsi induites, de soumettre ces inductions aux futurs contrôles.

D'un point de vue opérationnel, il ne suffit pas de construire de façon cohérente : il faut prédire des résultats vérifiables.

11 n'est pas nécessaire de développer une épistémologie, atteignant parfois la "divagation logomachique" (LWOFF, 1983), pour assurer un progrès constructif de la discipline mais simplement de s'efforcer de construire des théories réfutables et non des discours à clés multiples. La réfutabilité d'une prédiction issue d'une interprétation (chap. VI) dépend de son aptitude prédictive mais aussi de l'accessibilité aux données du contrôle par gestion de données (chap. V) ou/et de leur acquisition (chap. IV).

1.2.4. Ecologie et sciences humaines

L'écologie porte sur les systèmes écologiques ; ces systèmes suivent exclusivement les lois biophysicochimiques dans leurs régulations internes et dépendent de variables externes. Parmi ces variables externes, il y a les actions humaines ou actes (p. 96).

On pourrait considérer l'homme comme un être vivant parmi les autres répondant aux lois biophysicochimiques et inclure ainsi les activités humaines dans les systèmes écologiques, mais cette espèce a développé au cours de son évolution une aptitude intellectuelle spécifique non observable dans la totalité des systèmes biophysicochimiques.

La rationalité des décisions humaines relève des études conduites par les sciences humaines (économie, psychologie, politique, sociologie, ...) même si l'homme, comme tout élément de système écologique, dépend de son environnement global, les motivations de ses actes ne sont pas *ipso facto* la résultante d'une interaction simple homme-environnement à la différence des autres événements biophysicochimiques de l'écosphère. D'une façon générale, l'homme s'est largement affranchi des systèmes écologiques et réciproquement agit sur ceux-ci d'une façon souvent indépendante de leur nature intime. Par exemple, la mise en production d'un nouveau pesticide peut dépendre des liquidités financières de l'entreprise, elle-même influencée par la cotation d'une valeur mobilière dépendante de la tenue de la bourse. Ou encore la décision résulte, pour ce même produit, des effets d'une décision juridique ou de l'opinion d'un expert dans une commission d'homologation du produit, ou du retrait d'un produit concurrent, sous (ou en l'absence de) la pression de l'opinion influencée par le talent, ou la maladresse d'un journaliste..., etc. De même, pour le choix du matériel de traitement, le choix des méthodes culturelles conduisant au traitement pesticide qui finalement agit seul concrètement sur le système écologique. L'étude de ces processus de décision humaine relève de recherches socio-économiques et non de celles des relations des organismes avec leur milieu : elle relève des sciences humaines et non de l'écologie *stricto sensu*.

L'écologie étudiant les relations des organismes avec leur monde extérieur environnant "au sens le plus large" (p. 20) ne peut exclure les multiples actions humaines dans cet environnement. On sait qu'elles sont omniprésentes dans toute l'écosphère, à commencer par les transferts d'éléments artificiels créés par l'homme (par exemple DDT) ou largement produits sous son contrôle (CO₂, césium radioactif, ...). De ce point de vue, il est même impossible d'opposer une écologie fondamentale à une écologie appliquée, l'homme étant omniprésent. Opposer l'écologie fondamentale à l'appliquée est certainement beaucoup plus qu'un artifice, une erreur : aucun système écologique ne fonctionne sans les conséquences d'actes humains.

Nous verrons toutefois que dans l'action coutumière l'écologue ne peut - à un moment donné - appréhender la totalité des systèmes écologiques et qu'il est conduit

à une sélection réductrice qui pourra être focalisée sur des objectifs finalisés (écologie appliquée) ou sur des aspects fondamentaux. S'il est du ressort de l'écologue de prendre en compte les actes humains comme variables externes agissant sur les systèmes écologiques - et par là même d'en étudier les conséquences sur ces systèmes, il n'est pas de son ressort d'en rechercher les causes socio-économiques. Il n'a pas à étudier les raisons qui poussent le politicien à introduire des régulations de marché favorisant ou défavorisant le développement d'une spéculation agricole, ou qui le décident à entreprendre de grands travaux d'aménagement, voire un conflit militaire ; ceci ne relève pas de l'étude écologique. De même le choix d'un type de réacteur nucléaire ou le refus (ou l'acceptation) d'un contrôle démographique des naissances - qui ont tant de conséquences sur les systèmes écologiques - ne dépendent pas de l'étude de ces systèmes mais bien de relations sociales, économiques et politiques que l'écologie n'étudie pas : c'est le domaine des "sciences humaines".

Il est essentiel de bien distinguer la frontière écologie / sciences humaines car l'objet d'étude de l'écologue en dépend. Sans cette distinction claire, il est impossible de développer sérieusement une écologie opérationnelle, donc une écologie tout court. Comme toute science exacte, comme la physique ou la chimie, son développement social dépend de son efficacité sociale (p. 467) mais sa logique interne dépend de la véracité scientifique acquise vis-à-vis de l'objet d'étude matériel circonscrit qu'elle appréhende. Si le citoyen peut opiner sur les motivations des actes humains sur les systèmes biophysicochimiques de l'écosphère (= systèmes écologiques), si le spécialiste en sciences humaines peut en analyser les ressorts ou causes d'action, l'écologue n'a qu'à en considérer les effets dans les systèmes écologiques.

Ajoutons que le développement de l'écologie elle-même, souvent inharmonieux jusqu'à nos jours en raison de son incohérence initiale, dépend de "politiques de recherche" explicites ou implicites, qui relèvent des relations sociales, exprimées en terme de demandes, et non des connaissances écologiques (fig. 1-13, p. 104).

Les systèmes écologiques sont potentiellement susceptibles d'une description en terme de modèles biophysicochimiques rationnellement déduits des propriétés de leurs composants et organisation (p. 96). Nous verrons que ceci n'est pas utopique, (les systèmes reçoivent donc comme variables externes (exnéats) les actes humains, ceux-ci induisant des régulations biophysicochimiques (p. 272)

Ceci ne signifie pas que l'écologie n'a aucun rôle social ; bien au contraire elle devrait être la science exacte la plus omniprésente, car la plus proche de l'homme. Opérationnelle, elle doit prendre en compte inévitablement les actes humains et conséquemment devrait fournir aux décideurs (le paysan, le politicien, ..., la société en général) des faits exacts contribuant, parmi d'autres arguments, aux décisions socio-économiques (chap. VIII). Réciproquement, cela ne signifie pas que l'écologie s'applique aux domaines étudiés par les sciences humaines : une certaine logomachie liée à l'ignorance de la définition exacte de l'écologie a conduit à bien des usages abusifs, tel celui d'"écologie urbaine" (LEBRETON, 1987).

Les faits exacts étant entendus ici avec la même valeur que celle des autres sciences exactes, c'est-à-dire avec un degré de fiabilité relatif et connu. Ceci implique que l'écologie, dégagée de ses contre-sens, soit totalement opérationnelle (p. 98).

L'enregistrement correct des actes agissant sur les systèmes écologiques et la mesure de leurs conséquences constituent opérationnellement l'articulation entre l'écologie et les décisions socio-économiques.

1.2.5. Ecologie et interdisciplinarité

L'écologie a souvent été perçue comme "science de synthèse" ou comme domaine "interdisciplinaire". Cette affirmation révèle deux aspects complémentaires :

a) l'absence de perception du domaine d'application de l'écologie elle-même, en tant que discipline unitaire,

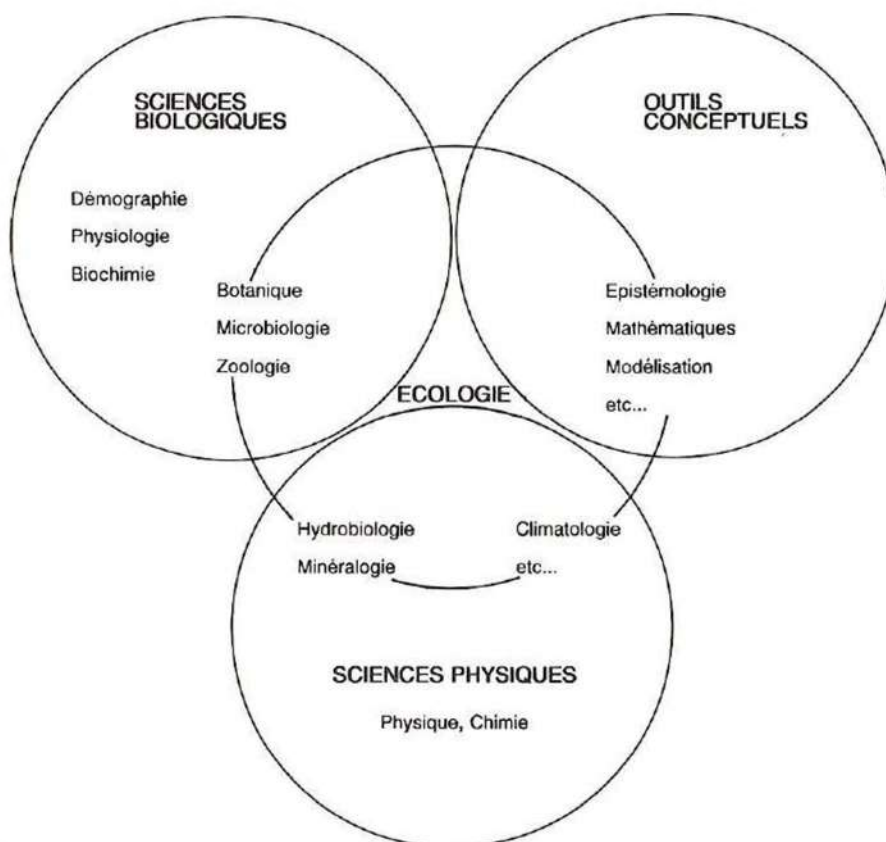


Figure 1-1 - Intersections des domaines scientifiques, relatifs aux sciences biologiques, logiques et physiques, avec l'écologie (d'après BOUCHE, 1980a)

b) le fait que de nombreuses disciplines contribuent à l'écologie.

En fait, ces affirmations, qui devraient aujourd'hui être dépassées, soulignent la situation initialement "morcelée" des approches qui ont largement précédé une recherche proprement écologique (où analyse et synthèse coexistent évidemment) et le poids considérable des disciplines périphériques et intersecantes (fig. 1-1) dont le développement a précédé historiquement celui de l'écologie (cf. Avertissement).

L'écologie, comme toute science exacte, a son propre domaine d'étude et ses démarches (c'est l'objet de l'ouvrage) et simultanément interfère avec de nombreuses autres divisions des sciences exactes (et humaines, p. 27).

Il en ressort que l'écologie hérite des concepts, donc du vocabulaire (p. 18), de formulations synthétiques et du renouvellement inévitable dû à la senescence des concepts dans chaque discipline concourant à l'écologie. A cela s'ajoute la diversité des sources (physiques, chimiques, biologiques, naturalistes et techniques).

Les échanges entre écologues, ayant subi des influences différentes, sont en conséquence difficiles ; ce qui est rigoureux pour l'un, est flou pour l'autre, ou encore le même terme peut avoir deux significations différentes (car adoptées à partir de disciplines différentes) ; enfin le même phénomène perçu par divers écologues praticiens ou fondamentalistes sera décrit et formulé mathématiquement de façon indépendante. On constate en fait que, pour des raisons d'efficacité évidentes, les disciplines concrètement opérationnelles n'abordaient qu'une partie "réduite" de l'écologie mais que ces parties se regroupent aujourd'hui (voir 2ème partie) ; ce

réductionnisme historique pèse toutefois très lourd sur les pratiques et concepts dont nous avons hérités.

D'un point de vue opérationnel, il faut surmonter la contradiction de la nécessaire collaboration entre experts (ces experts, étant issus de disciplines parfois fort diverses, se comprennent mal) et du caractère réduit et spécialisé de la perception de chaque intervenant apportant au débat un nombre limité, et souvent en pratique inaccessible, de données objectives, seules bases sérieuses de réfutation.

Cette double difficulté peut aujourd'hui être très largement surmontée par l'élaboration de Bases de Connaissances où les données objectives et de potentialités gérées en Bases de Données Relationnelles sont confrontées aux opinions explicites des experts dans des Systèmes-Experts se prêtant précisément à la prise en compte d'heuristiques (= opinions procédurales explicites).

La disponibilité de tels outils, en cours d'élaboration, modifie totalement l'attitude scientifique et l'aptitude technique, car elle oblige à tous niveaux aux énoncés explicites et accélère considérablement les échanges d'information de sorte que la connaissance pourrait être incessamment soumise à contrôle en privilégiant les éléments les plus réfutables et les acquis les mieux contrôlés. Dès lors une écologie authentiquement scientifique - au sens de Haeckel - devient totalement possible.

Mais entre la situation du naturaliste du XIX^{ème} siècle condamné à une vision grandiose de ["histoire de la création naturelle" (p. 23) et la position d'un écologue authentiquement scientifique (du XXI^{ème} siècle ?) se trouve la situation actuelle d'une écologie balbutiante.

Cette mise en commun entre expert par Intelligence Artificielle oblige(ra) à une intelligence naturelle s'appuyant sur une intelligibilité. Cette dernière oblige à une univocité sémantique, car une telle explication automatique ne peut faire cohabiter plusieurs concepts pour un même terme et plusieurs substantifs pour un même objet.

Il est facile de concevoir que chaque discipline soit conduite au cours de ses progrès à élaborer son vocabulaire, ses formules et sa présentation particulière des connaissances. Ceci est normal.

Il n'en reste pas moins que l'écologie se doit d'avoir une présentation unitaire avec un vocabulaire univoque et rigoureux, la rigueur évitant de masquer sous un écran de fumée verbeux, une carence logique ou empirique.

Le choix de ce vocabulaire ne peut et ne doit pas se faire en ignorant celui des disciplines connexes car, comme toute science, et peut-être beaucoup plus que certaines, l'écologie n'est qu'une contribution particulière aux connaissances et son aptitude à transmettre dépend de ces choix.

Il en découle que :

1) Dans toute la mesure du possible les termes retenus doivent être ceux qui sont consacrés par la discipline connexe.

2) Toutefois, des difficultés existent lorsque le même terme est utilisé avec des sens différents, parfois partiellement différents (ce qui est encore plus trompeur) dans deux disciplines adjacentes et sécantes à l'écologie. La tentation du néologisme pour exclure des malentendus est toutefois lourde de conséquences car elle conduit à des non-entendus devant ce terme nouveau, incompris.

3) Les néologismes sont évidemment indispensables pour désigner des objets ou concepts nouveaux. Ils ont par contre souvent, mais pas toujours, des conséquences pires que la situation décrite en 2).

Dans des domaines essentiels de l'écologie (au sens littéraire de fondamental) il est toutefois indispensable de trancher le plus efficacement possible. Les choix faits par l'auteur sont justifiés dans le texte de l'ouvrage aux paragraphes adéquats. Ces termes, indiqués en caractères helvética, sont parfois utilisés par nécessité avant le chapitre où ils reçoivent une définition rigoureuse. Un index avec renvois aux paragraphes adéquats est donné à la fin de l'ouvrage.

1.3. L'information écologique

1.3.1. Introduction

Toute connaissance sur les <<relations des organismes avec leur monde extérieur environnant>> constitue une information écologique. Acquérir de telles informations, les ordonner, les interpréter constituent la tâche primordiale de l'écologue.

En raison de l'extraordinaire complexité de l'écosphère et de son étendue, le travail journalier de l'écologue, ou du technicien agissant dans la biosphère, ne peut être appréhendé à la fois en totalité et en détail. L'un des problèmes majeur concret des démarches écologiques est donc de permettre à la fois les études les plus fines et précises nécessaires pour comprendre des systèmes écologiques partiels, et simultanément d'inscrire concrètement ces observations particulières dans les ensembles généraux pour obtenir à la fois une perception globale (par exemple, le bilan des échanges du CO₂ dans l'écosphère, dans le cadre du cycle du carbone), et une connaissance des mécanismes y contribuant (par exemple, la respiration/photosynthèse de telle espèce végétale ou l'oxydation du stock de matière organique morte sous l'effet d'un hersage). Ce problème majeur ne sera pas résolu sans une rigueur dans l'élaboration des connaissances. C'est à ce prix que l'écologie est (ou sera) une "gesammte Wissenschaft" - une science globale.

Distinguons ici deux types d'information dont nous disposons et qui jouent constamment un rôle important dans la démarche écologique.

1) Les potentialités, ou informations sur les propriétés potentielles, observées aux plans physiques, chimiques, ou biologiques. Des études conduites en physicochimie, thermodynamique ou en biologie physiologique nous apportent des connaissances générales, fondamentales sur les aptitudes potentielles de tout sous-élément des systèmes écologiques. Par exemple nous savons que potentiellement les êtres vivants respirent. Mais lorsque ces connaissances sont acquises hors champ écologique, il n'est pas possible de connaître leur importance, voire leur simple occurrence dans ce champ. Utiles dans la réflexion de l'écologue, ces potentialités ne nous informent pas sur le champ écologique et ne sont pas des informations directement utiles pour une interprétation des systèmes écologiques.

2) Les réalités ou informations écologiques portent essentiellement sur les mêmes propriétés mais dans le cadre des régulations multidimensionnelles (= très complexes) des systèmes écologiques : la façon dont la potentialité s'exprime (y compris nullement) dépend de nombreuses régulations incluses dans le système écologique considéré. S'il est possible par isolement, de démontrer une potentialité, l'écologue se doit en outre d'acquérir des informations écologiques dans la réalité (p. 49), le mot réalité porte ici sur le domaine intrinsèque de l'écologie : l'écosphère.

Remarquons qu'ici nous employons le mot information dans son sens générique et non dans ses acceptions plus techniques qui seront développées au paragraphe 1.7.1.

L'information écologique porte symétriquement sur les organismes et <<leur monde extérieur environnant>> (cf. p. 20, définition et conséquence n°3). L'écologue peut être conduit à considérer <<le monde extérieur environnant>> d'un organisme, d'une communauté d'organismes mais aussi ce qui est extérieur à des ensembles d'organismes. Cette relation d'un objet d'étude "central" et de son extérieur sera reprise plus explicitement au paragraphe 1.7. traitant de l'information écologique mais il faut dès à présent distinguer le couple "objet central d'étude" et son extérieur. Pour cela deux usages sont fréquents : on désigne l'objet (implicitement "central") et son monde extérieur environnant par le mot milieu ou le mot environnement. Ces deux mots ont toutefois reçu des co-notations qui dans certains usages écologiques peuvent devenir ambiguës.

L'environnement est de plus en plus perçu par le grand public comme l'environnement humain et l'on parle aujourd'hui de "problèmes d'environnement" en sous-entendant ceux existant dans notre environnement, souvent du fait de nos activités. Sauf contexte ne souffrant aucune ambiguïté, je n'utiliserai le mot environnement que dans son contexte lié à l'environique (p. 21). L'environnement devient alors précisément l'ensemble du milieu extérieur à l'homme.

Le milieu a reçu depuis longtemps le sens exact de *fungebeden Aussenwelt* de E. HAECKEL par rapport aux organismes. Toutefois pour des raisons de changement d'objet d'étude certains physiologistes parlent de milieu intérieur pour définir des conditions globales (sanguines, thermiques, ...) prévalant dans un organisme. Hormis cet usage, d'ailleurs désuet, le milieu signifie donc l'ensemble des éléments extérieurs à l'(aux)organisme(s) objet(s) de l'étude. L'étude spécifique des caractéristiques extérieures à un groupe d'organismes (à ne pas confondre avec les relations milieu/organisme) constitue la mésologie (p. 191).

Je propose, en considérant un système écologique quelconque incluant des parties vivantes et non vivantes d'utiliser le terme générique d'entour pour ce qui est extérieur à cet objet central d'étude.

Dans ce contexte, le vieux mot entour (tombé en désuétude) reçoit une signification générique pour désigner tout ce qui est extérieur à un système central d'étude, le mot milieu restant spécifiquement attaché à l'entour des organismes et celui d'environnement à l'entour de l'homme.

Avant de décrire les propriétés majeures constitutives des systèmes écologiques (aux chapitres II, III) et les procédés d'élaboration de la connaissance écologique (chapitres IV, V, VI, VII) il est nécessaire de décrire quelques grandes démarches générales permettant d'accéder à la connaissance de ces systèmes.

1.3.2. Données et connaissances

1. I je domaine des études

Le domaine de l'écologie est très étendu. Science globale recouvrant tous les lieux où des organismes vivent dans leur milieu, elle porte sur toute l'écosphère. Certaines études écologiques peuvent toutefois être circonscrites à l'étude des relations des caractéristiques du milieu prévalant autour d'un individu, par exemple d'une plante. Les écologues peuvent ainsi considérer des espaces allant de la dizaine de milliers de kilomètres au micromètre ! Les observations écologiques portent de même sur des durées différentes : un débit respiratoire est observable en quelques secondes, un déplacement d'une cohorte d'animaux sur de grandes périodes de temps, allant d'une saison à plusieurs dizaines d'années, voire, par une documentation historique ou paléogéographique, une reconstitution paléo écologique peut porter sur des dizaines ou des centaines de millions d'années, notamment pour tenter de reconstituer l'évolution qui a abouti aux relations écologiques actuelles.

Une telle variété d'échelles de temps et d'espace ne va pas sans difficultés. Une des difficultés apparente majeure de la démarche écologique réside dans ces changements d'échelle : une approche globale de l'écologie oblige à adopter pour chaque étude un domaine de l'échelle spatiotemporelle. Cette difficulté peut aujourd'hui être facilement surmontée (en fait, elle n'existe pas, p. 456) mais exige pour cela une acquisition et gestion sérieuse des données (chap. IV, V).

L'écologie étant par nature une approche globale, mais étant aussi une science exacte, se doit d'être pratiquée à la fois de façon précise, parfois très spécialisée, et en même temps ces pratiques particulières doivent entrer dans un cadre général non arbitraire. Cette vaste ambition liée à l'exigence de rigueur (précision) rendent la pratique de l'écologie presque utopique ou inhumaine... échappant à l'entendement du spécialiste, tout en étant en soi une spécialité. Cette situation a engendré de très nombreuses erreurs, même par d'excellents écologues.

Toutefois, il ne s'agit pas d'un objet inaccessible, si la gestion des connaissances, fondée objectivement sur les informations écologiques est effectuée rigoureusement (cf. 2ème partie), ce qui devient chaque jour plus efficace par l'intelligence Artificielle.

L'écologue, comme tout scientifique, assure les progrès de sa discipline par une perpétuelle remise en cause, par un ré-agencement des connaissances plus conforme aux faits. La difficulté vient de l'immense sujet de l'écologie face au faible nombre d'écologues ; la difficulté vient aussi du fait que l'objectif de globalité, souvent perdu de vue, est fréquemment "évacué" par des périphrases ou tautologies, propres à satisfaire une écologie "de salon", mais desservant la discipline scientifique.

Les progrès même lents de l'écologie et l'avènement d'outils (notamment informatiques), permettant de saisir globalement, rigoureusement et explicitement, une multitude de faits écologiques particuliers, ont changé et changent encore cette situation de façon très sensible.

La gestion de l'information écologique doit être faite de telle sorte que les données acquises à une échelle lemporo-spatiale soient utilisables à d'autres niveaux de perception de façon méthodologiquement critique.

Ajoutons enfin que les caractéristiques écologiques observées peuvent être perçues, et de fait acquises (p. 267) à des niveaux de perception très différents. Par exemples et de façon toujours plus focalisée, on peut enregistrer un climat régional, à l'intérieur de celui-ci une prairie, et dans celle-ci un faciès de végétaux associés, et pour celui-ci noter le profil d'un sol où l'on observe un horizon dont on peut décrire l'azote total, ou seulement son état ammoniacal NH_4^+ et dans ce dernier la fraction de l'isotope ^{15}N .

Les changements d'échelles se font avec une relative aisance lorsque l'on réfère les données à des échelles métriques d'espaces et de temps, et nous n'avons plus aucune raison de nous en priver (p. 296). Ces changements d'échelle sont quelque peu délicats lorsque ces références sont non métriques, nous sommes amenés alors à parler de station, région, ... pour indiquer ces changements. Ainsi la notion de niveau de perception, développée notamment par les phyto-écologues (LONG, 1974), permet une première hiérarchie qualitative des objets d'étude dans l'espace (temps négligé). Le Tableau 1-1 résume la nomenclature hiérarchisée utilisée pour décrire les niveaux de perception dans les paysages observables, et objet de cartographie. Il s'agit d'une classification pragmatique introduisant une discontinuité qualitative dans le continuum des niveaux d'observation (p. 35).

Plus difficiles peut-être seront les études portant sur des caractéristiques concrètes rapportées à un objet temporo-spatial abstrait, tel le débit d'une substance dans une portion d'écosystème exprimé en $q/s/m^2$ (q = quantité, s = seconde, m = mètre carré) où la seconde est une unité de temps arbitraire quelconque se référant en fait à un phénomène instantané et où le m^2 est également un arbitraire quelconque (dans la nature, tous les mètres carrés sont fonctionnellement différents et hétérogènes, dans leur surface, etc.). Il s'agit en fait d'une quantité se rapportant à un point, débitée de façon instantanée, qui est mesurable et exprimée par nécessité technique dans des unités spatiotemporelles conventionnelles.

Cette échelle spatiotemporelle - ponctuelle et instantanée - doit être clairement comprise. Beaucoup d'écologues, marqués par leur technique concrète de mesure, répugnent à cette abstraction pourtant indispensable pour optimiser la démarche de nombreuses recherches écologiques, et permettre ultérieurement interprétations et synthèses.

NIVEAUX DE PERCEPTION	UNITES DE VEGETATION	QUELQUES CARACTERISTIQUES PREPONDERANTES	SYSTEMES ECOLOGIQUES * =écosystème	ECHELLE (cartes, figures)
Globe terrestre	Végétation de la biosphère	Planète terre, compositions globales	Ecosphère*	> 1/10 ^K
Zone écologique	Grands types de végétation. Ex : forêt équatoriale, Sahel	Latitude macroclimat	Ecome* (zone)	> 1/10 ⁷
Région écologique	Type de végétation (maquis, garrigues)	Relief général, climat régional, roche mère, dominante (ex : socle hercynien), pressions anthropiques	Ecome régional* (Euécome) (Oroécome) (Péd écome)	1/10 ^B à 1/50 000
Secteur écologique	Grandes formations végétales Ex : divers types de maquis	Position topographique climats locaux, classes de sols, système agraire	Ecome local*	1/250 000 à 1/50 000
Station écologique	Formations végétales, végétation cultivée	Relief et sol (pente, orientation, sous-classe de sol), unité de gestion, la parcelle	Holocénose* large	1/25 000 à 1/1 000
Élément de station	Faciès de végétation	Microrelief, variante édaphique (ex : mobilière), actions animales (ex : reposoir) ou humaines (extrémité de parcelles)	Holocénose* stricte	1/500 à 1/1
POINT	1 relevé	Intrapolation	Pieu*	Point
Strate	Plancton Racines	Niveau d'échange trophoénergétique (Ex : zone chlorophyllienne, planctonique, benthique, sol)	Subécosystèmes Strate	1/1 à 1 x 100
Syntégron	Rhizosphère phyllosphère lichens	Organes ou organismes associés à un abios structuré infracentimétriquement, symbiose	Syntégron	x 1000 à x 10 ⁶

Tableau 1-1 - Niveau de perception et principales caractéristiques végétales générales : systèmes écologiques correspondant et échelles de représentation usuelles (pour partie d'après LONG, 1974, modifié)

2. Démarches analytiques, synthétiques et globales

Le niveau d'observation situe dans le spatiotemporel toute caractéristique (p. 43) entre le plus global et le plus particulier. En fait, toute caractéristique peut être décomposée en parties plus élémentaires et réciproquement entre dans la composition d'un système plus large.

Pour l'interprétation écologique et les outils analytiques et de synthèse existant, le niveau d'observation n'a *a priori* aucune importance (si ce n'est d'un point de vue d'efficacité du choix de la composition optimale à étudier pour un objectif de recherche précis, p. 437). Il faut toutefois bien distinguer les démarches d'analyse (recherches de caractéristiques plus élémentaires, à partir d'un caractère plus général) de la synthèse (reconstruction à partir de caractéristiques détaillées d'un ensemble synthétique) et de la globalité (qui d'emblée observe une caractéristique à un niveau de composition donnée). Une synthèse ne peut contenir que la résultante des analyses et des hypothèses la sous-tendant : elle ne correspond pas *ipso facto* à la globalité qu'elle tend à représenter (p. 41).

Confronter le résultat d'une synthèse à une information globale constitue un important moyen de vérifier la qualité des choix d'analyse (p. 267) et des choix de traitement (p. 344) effectués dans la démarche d'analyse-synthèse.

Les termes "analyse" et "synthèse" sont parfois utilisés de façon ambiguë. Ils désignent souvent à la fois l'opération et le résultat de celle-ci. Nous ne les emploierons qu'au sens strict, c'est-à-dire comme résultats sinon un verbe précèdera et montrera qu'il s'agit d'une action. Faire l'analyse (analyser) aboutit à l'analyse d'un objet d'étude ; effectuer une synthèse (synthétiser) conduit à la synthèse comme résultat de la démarche.

En pratique, pour toute démarche intellectuelle relative à l'élaboration (des connaissances) écologiques (cf. 2ème partie), on réfère le travail *ipso facto* à deux niveaux d'observation (par exemple les plantes de la prairie, le taux de carbone du sol, la croissance printanière, le débit de la rivière, etc.). Il y a un niveau N global (prairie, sol, printemps, rivière, dans les exemples ci-dessus) auquel se rapporte certaines caractéristiques analytiques (réduites ou analytiques, en ce sens qu'il ne s'agit que de quelques caractéristiques parmi beaucoup d'autres propres aux niveaux N). Ces caractéristiques analytiques (respectivement chaque plante, le taux de carbone, un état de croissance, le débit) décrivent une partie de la composition du niveau N et appartiennent à un niveau inférieur (plus analytique = $N - 1$).

Opérationnellement, on envisage donc toujours au moins deux niveaux d'observation, l'un par rapport à l'autre. (Nous verrons, p. 71, qu'en terme de système ce peut être un systémon, s'il y a connexité systémique). On peut évidemment changer de paire de niveaux d'observation et considérer ensuite soit un niveau supérieur (= plus global : $N + 1$), telle la croissance annuelle (incluant N, la croissance printanière) soit un niveau inférieur ($N - 2$), tel un organe d'une plante de la prairie. Mais du point de vue opérationnel, nous faisons en ce sens une option (p. 46) qui ne peut porter que sur une paire de niveaux d'observation en systémique ou sur un seul niveau à chaque opération, en comparaison typologique.

3. I^{er} champ écologique

Toute information écologique se situe à l'intérieur d'un hyperespace ayant, entre autres, les trois dimensions orthogonales de l'espace habituel (= euclidien) et le temps. Elle est elle-même une indication particulière (information particulière : un chou, 15 % d'azote, 25 millibars) résultant d'une analyse, l'isolant d'un ensemble plus vaste d'autres informations du même espace-temps ; elle est un élément de la composition de la portion d'espace-temps prise en compte.

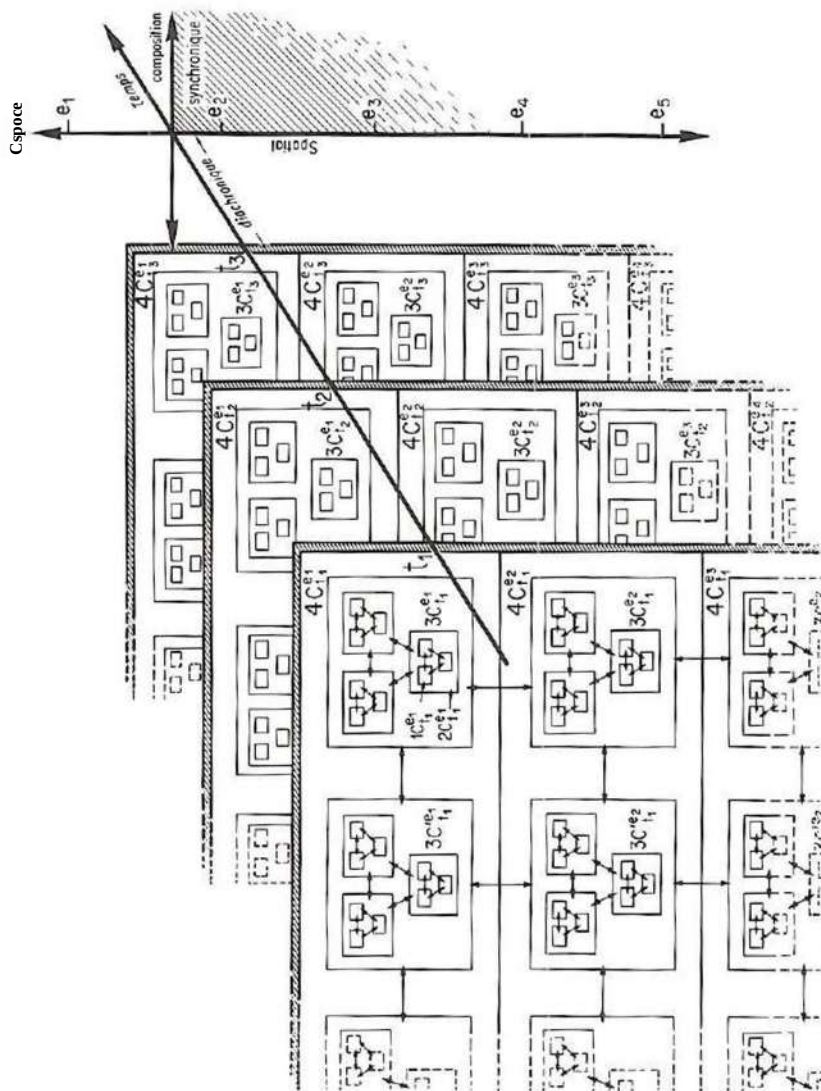


Figure 1-2 - Schematisation des systemes. Tout element d'un niveau d'observation est l'etat d'un objet (figure par un carre) ou une cinese entre objets (figuree par une flache) d'un systeme dont le modele, image de la partie perue (globalyse, fig. 1-3), se situe dans le temps (deux dimensions), l'espace E (trois dimensions) et dans le referendaire composition C (n dimensions) susceptible de decomposition (figuree par emboitement $1C, 2C, 3C, \dots$), de connexions ($C, C', \dots$) variees, dans l'espace ($C^1, C^2, \dots$) et le temps ($C_{11}, C_{12}, \dots$).

Les informations issues de la composition peuvent être recomposées en ensembles moins analytiques ou au contraire précisées par des analyses plus fines. La composition peut enfin s'exprimer selon une infinité de niveaux d'observation analytiques allant du global au plus particulier, selon des modalités définissables. La composition est l'ensemble des caractéristiques que l'on peut attribuer à un objet d'étude (= de niveau d'observation quelconque) quelle que soit l'analyse. La somme des informations possibles constitue donc un hyperespace très complexe et souvent hiérarchisé. Une portion d'espace peut comporter une branche d'arbre dont on analyse la morphologie foliaire dans laquelle on choisit par sélection hiérarchique dans une série juvénile, un pétiole, pour en extraire les protéines puis on sépare l'acide aminé cystéine dont on isole le carbone pour en caractériser l'isotope ^{14}C ... Remarquons que cette démarche constitue une cascade de choix... On n'a pas étudié les autres branches, ni les autres isotopes du carbone, ni les autres éléments, ni les autres acides aminés... Il y a à la fois une hiérarchie analytique et des options entre caractéristiques étudiées ou non étudiées sur la composition d'un objet d'étude (fig. 1-2).

J'appellerai référendaire chacune des trois composantes majeures du champ écologique : l'espace, le temps, la composition. Le référendaire étant ici pris au double sens de portion du champ écologique et de référence nécessaire.

Ces trois référendaires imposent leur maîtrise dans l'organisation de l'écologie opérationnelle : leur distinction claire s'impose à la fois dans l'étude systémique de l'écologie (p. 96, 424) dans la modélisation (p. 390) et dans le référentiel des données (p. 296).

Repérer une information écologique est essentiel pour l'interprétation. Celle-ci se fera toujours en cherchant à acquérir, ordonner ou regrouper des données par rapport au champ écologique, c'est-à-dire en suivant l'ordre des analyses très diverses de la composition d'un objet repéré par les positions spatiales (3 axes euclidiens) et le repère temporel (date, durée).

Réciproquement, toute information n'est valide que si elle est clairement située dans le champ écologique par la référence explicite ou implicite à ses trois référendaires. Le niveau de perception n'étant qu'une façon qualitative de désigner la portion du champ écologique que l'on considère en particulier pour une analyse plus détaillée, les modalités pratiques réellement opérationnelles des repérages dans le Champ écologique seront abordées dans la deuxième partie de l'ouvrage (chap. IV).

On peut donc considérer, depuis le champ écologique le plus général défini simultanément par ses référendaires euclidiens, temporels et de composition, des niveaux d'observation dans un ensemble allant du plus global au plus analytique (par réduction euclidienne ou/et temporelle ou/et compositionnelle) ; il n'y a scientifiquement pas de limites inférieure ou supérieure à ces études : il y a toutefois limite du domaine écologique, du champ écologique supérieur et inférieur (ce point sera développé au chapitre VIII). L'art de l'écologie ne sera ni dans l'étude de l'infiniment petit, ni dans celle de l'infiniment grand, mais bien au contraire dans l'approfondissement des moyens d'analyse-synthèse et dans la confrontation des résultats au global, le synthèse étant différente de la globalité.

Les observations concrètement effectuées (= données acquises) résultent d'options sélectives. L'écologue limite ses études à certaines parties du champ écologique et dans celles-ci à certaines caractéristiques. Réciproquement, l'information acquise ne porte que sur des fractions du champ écologique se situant entre le "plus" global et les diverses focalisations analytiques possibles (dans l'espace, le temps et la composition).

Cette fraction perçue, connue, du champ écologique est sa globalyse. La globalise joue un rôle essentiel dans toutes les approches concrètes de l'écologie, dans toute l'écologie opérationnelle, puisqu'elle représente la (seule) partie

effectivement perçue et observée du champ écologique : elle en est l'information objective.

4. Le temps

Tout objet d'étude écologique est issu du passé. A un instant (pris au sens instantané) les données observables (comparables à une image photographique) résultent de phénomènes ayant un passé plus ou moins lointain. L'algue qui pousse sur le sol de la prairie s'est développée depuis sa spore il y a quelques heures, tandis que le puceron sur la plante a quelques dizaines de jours, la vache quelques années, le chêne du bouquet d'arbres quelques dizaines d'années et la pierre sur le sol s'est modifiée en des dizaines de milliers voire de millions d'années quoiqu'elle participe avec les sables et les argiles à un ensemble-sol en perpétuel remaniement. Chaque organisme est lui même un individu particulier issu de recombinaisons parentales sur des millions d'années.

A chaque instant, les éléments en place guident, dictent largement les évènements suivants. La pierre sera encore là, le chêne aussi (si le temps séparant de l'instant suivant est assez court) quoiqu'il aura changé, l'algue se sera modifiée, etc. Les éléments au temps $t + 1$ ne sont pas quelconques vis-à-vis du temps t , ils ont reçu des éléments issus de t . Les faits (données) d'un système antérieurs à l'instant t d'observation donc agissant sur l'état de ce système à cet instant - sont les innés (p. 97).

Toute interprétation écologique se place dans l'espace-temps, toute interprétation fait intervenir le temps, l'évolution des faits, des choses, des informations, des réalisations au cours du temps : l'enregistrement du temps est un lien obligatoire, un référendaire de toute donnée écologiquement référée (p. 265). Il faut distinguer la date comme "instantanée" dans l'échelle du temps (même si cette date n'est pas calendaire, mais exprimée en secondes par exemple) et la durée comme étant le temps entre deux dates.

Du point de vue du fonctionnement des systèmes écologiques, le temps peut ne pas être perçu comme homogène - au sens de l'écoulement de celui-ci dans une montre. Les choix de dates ou/et durées peuvent être arrêtés par rapport à des critères phénoménologiques, tels les stades phénologiques d'un arbre fruitier ou le phyllochrone d'une talle de graminée. Toutefois ceux-ci sont toujours en outre repérables dans le temps universel.

5. L'espace : hétérogénéité et continuum

D'une façon générale le champ écologique, qu'il soit vu globalement (l'écosphère) ou sur un de ses détails, est en perpétuelle transformation (changement de formes des états) sous l'effet des cinèses qui échangent matière et énergie ; tout ensemble peut être analysé, disséqué pour décrire sa diversité morphologique et fonctionnelle. Deux ensembles distincts dans l'espace, qui peuvent paraître semblables à certains égards, vont apparaître différents si on les analyse différemment soit plus en détail, soit plus globalement, soit avec d'autres analyses, soit à d'autres moments. Dans l'absolu, seule l'hétérogénéité existe, à tous les niveaux d'observation ; il y a continuum à hétérogénéités variables pour des raisons profondément liées à la physique de l'écosphère (p. 198, 374).

Les trois référendaires du champ écologique sont en pratique hétérogènes. Toute portion d'espace comporte une hétérogénéité interne, tout niveau de composition peut être décomposé en éléments plus "fins" et plus précis. Quant au temps s'il semble s'écouler de façon continue, régulière du point de vue chronologique, mais du point de vue de l'ensemble des systèmes biophysicochimiques il est en fait profondément hétérogène. Sa signification est notamment totalement différente en fonction des rythmes "jour-nuit" (nycthéméraux), saisonniers (annuels) et

pluriannuels (cycle de 11 ans, etc.), ces cycles étant dus notamment à la relation complexe de notre planète avec sa principale source énergétique (le soleil), animatrice essentielle des systèmes écologiques.

On devra toujours acquérir des données, puis organiser et interpréter celles-ci pour en étudier l'hétérogénéité.

Certains ensembles de données, par rapport à d'autres, sont moins hétérogènes. Cette identité relative très localisée dans la globalyse du champ écologique (c'est-à-dire de la perception que l'on en a) permet alors de parler d'ensembles homogènes. L'homogénéité est un cas particulier de l'hétérogénéité et n'est usuellement qu'une hypothèse commode à l'intérieur d'une synthèse. En toute rigueur, on ne fait qu'étudier et comparer des hétérogénéités plus ou moins grandes, l'homogénéité n'étant qu'un cas limite de celles-ci.

Dans la pratique de l'élaboration écologique toutefois, il est fréquent d'opposer plusieurs ensembles dont on souhaite que chacun d'entre eux soit (le moins hétérogène) le plus homogène possible. On parle alors par simplification et sur la loi d'une supposition empirique d'ensembles homogènes (champs cultivés homogènes, prise de sol homogène, paysage homogène) voire, pour certains travaux, on homogénéisera (par exemple, par brassage de sol, en ne semant qu'une variété de blé, en éclaircissant une forêt, etc.). L'homogénéité est donc avant tout un concept portant sur des suppositions, pratiquement commodes pour exprimer une opinion générale abstraite. Inversement l'hétérogénéité, plus ou moins grande, est mesurable dans les ensembles (considérés initialement, ou non, comme homogènes) par des expressions statistiques dont l'écart-type est le plus fréquent.

Il n'est pas rare que l'étude de l'hétérogénéité à l'intérieur d'un ensemble (par la comparaison de sous-ensembles) permette d'observer un changement graduel. Par exemple, la flore d'un territoire peut être totalement différente sur un autre mais entre les deux territoires il y a graduellement disparition des espèces du premier et apparition d'espèces du second. Il y a au niveau de perception choisi et pour le type d'analyse impossibilité de situer dans le champ écologique un changement brutal : il y a continuum. Discontinuité et continuum constituent un autre doublet conceptuel à la base de multiples "difficultés" d'interprétation. Pour reconnaître, classer, l'information écologique, les écologues sont conduits en effet à définir des classes dont souvent (mais pas toujours) les limites sont arbitraires ou dépendent d'un niveau de perception dans le champ écologique si mal défini que les controverses - souvent par défaut d'information - peuvent exister.

Nous verrons au Chapitre V que la possibilité de conserver les données initiales, sans présupposer d'interprétation, lève en partie cette difficulté (sans de fait l'éliminer mais en permettant de ré-interpréter à chaque progrès). Par opposition à la possibilité de changements graduels (= continnants) on parle parfois de "coupures" ou *écotones*, concepts dont l'appréciation subjective dépend des échelles de temps-espace et de composition adoptées (p. 422) mais dont l'importance opérationnelle est grande en raison des changements spatiaux qui s'y produisent (orées, haies, berges en sont des exemples). Des travaux récents soulignent leur importance (Di CaSTRI *et al.*, 1988).

6. Champ écologique et choix des données : analyse, synthèse et globalité

La démarche analytique (fig. 1-2) est assez généralisée pour ne pas poser de problèmes ici - si ce n'est celui du choix du Niveau des observations (p. 35) retenues pour arrêter l'analyse et des options analytiques nécessairement opérées dans celui-ci. Tout dépend des objectifs et moyens disponibles ; une analyse plus détaillée aura toujours pour corrolaire un accroissement des données, des coûts d'acquisition et parfois des difficultés de vraie synthèse.

Modèle Globalyse j Champ écologique Systèmes

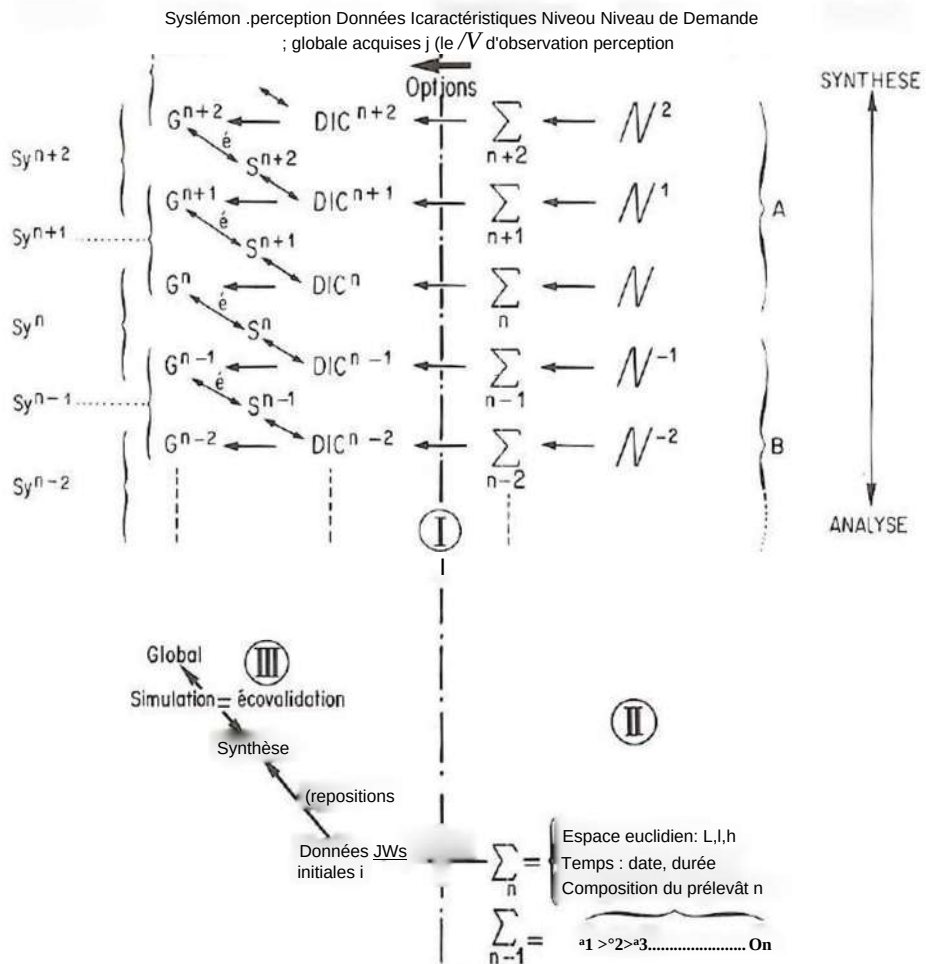


Figure 1-3 - Le champ écologique et sa globalyse. A l'intérieur d'un niveau de perception A, B, C (fig. 1) (station, secteur, région, cf. tableau 1), il faut opérationnellement choisir un niveau d'observation (N) contenant (fig. II) un nombre très grand, sigma-n, de caractéristiques observables dans le champ écologique, au moins les 3 axes euclidiens de l'Espace (E), les date et durée Temporelles (T) et une infinité de caractéristiques biologiques, physiques, chimiques de sa Composition (C). Ces 3 référentiels E, T, C étant susceptibles de descriptions plus fines au niveau d'observation. sigma-n, par analyse (fig. I). Opérationnellement, les options limitent l'acquisition des données à quelques niveaux et les caractéristiques produisant des données objectives ou DICs. Chaque DIC n-1 informe partiellement (fig. I et III) sur le global perceptible en N (G^n) et, moyennant des propositions, contribue à la synthèse S^n simulant le niveau N valable par G^n au système écologique correspondant par écovalidation (é) du modèle du système Sy^n .

On peut donc choisir, selon les moyens disponibles, soit de concentrer l'effort pour analyser à un niveau d'observation détaillé sur un nombre de points d'étude restreint, soit accroître le nombre de points d'étude pour une acquisition de données plus globales (p. 441).

La synthèse offre par contre plus de difficultés car elle est souvent confondue avec globalité et avec généralisation. La synthèse est la reconstruction à partir des éléments analysés d'un ensemble plus complexe ; c'est une recombinaison d'un ensemble préalablement décomposé. Pour que cette recombinaison aboutisse à la composition initiale, il faut et il suffit que l'on possède toute l'information sur le contenu des sous-ensembles de l'ensemble décomposé et sur l'organisation de ces sous-ensembles. Il suffit que la globalité contienne toute l'information. C'est en pratique très rarement le cas en raison des limitations tant analytiques que synthétiques.

La globalité est une perception qui d'emblée reste à un niveau d'observation sans décomposition et recombinaison. Comparer les résultats d'une étude globale (pour un niveau d'observation) avec les résultats obtenus après analyse puis synthèse (décomposition et recombinaison) jusqu'à ce même niveau est un test de la qualité de ces analyses et synthèses (fig. 1-3).

La généralisation est une démarche purement subjective d'extrapolation de données éparses à des ensembles plus vastes. C'est une démarche très fréquente dans les livres dite à tort de "synthèse" sur un sujet. Un auteur, utilisant les moyens de son expérience y brosse généralement un panorama d'un sujet, panorama plus riche que la simple compilation (= addition) des éléments d'analyse cités car assorti d'une structure et de jugements de valeur. La généralisation n'est pas en soit fautive... mais n'est souvent pas réfutable directement à partir de ses éléments constitutifs. Il s'agit d'une supputation (p. 346). Un moyen de contrôler la validité de telles supputations est d'en tirer des conséquences univoques contrôlables permettant de réfuter les prédicats résultant de cette généralisation (p. 24).

Au plan technique, analyse, synthèse et globalité portent sur des données et sur leur organisation et sont réfutables tandis que la généralisation est tout au plus une approximation subjective hypothétique généralement non vérifiable.

La perception d'un système écologique (p. 92), en termes de donnée acquise s'effectue donc à un niveau d'observation soit d'emblée globalement (sans analyse) soit par une analyse à des niveaux d'observation inférieurs complétée d'une synthèse testée par validation à la globalité du système (fig. 1-3).

7. Données objectives et hypothèses

En pratique, les connaissances écologiques sont fondées sur des données. Ces données ne représentent qu'une infime partie de l'information potentiellement présente dans le champ écologique. Cette fraction, la globalité, résulte des hypothèses, nécessairement réductionnistes : des options. Ces options limitent le travail à une problématique (et non à d'autres qui sont écartées) puis à un objectif (et non à d'autres), puis... Cela réduit l'information acquise à partir d'options qui sous-tendent hypothétiquement que ces choix sont les moins mauvais possibles pour représenter le réel (p. 267, 277). Si ces options "réduisent" les données disponibles, elles n'en modifient pas la valeur intrinsèque (chap. IV), les données reflétant directement notre perception, même limitée, de l'objet d'étude (= données objectives).

Mais ces données initiales réduites et analytiques ne permettent pas isolément de conclusions générales de synthèses. Pour celles-ci, une autre famille d'hypothèses les propositions tendent à transformer les Données Initiales Contrôlées (DICs) en Données Secondairement Elaborées (DSEs) qui en résument certaines propriétés tout en posant l'hypothèse que ces DICs sont suffisantes (ou remplaçables par quelques artifices) pour que les propriétés-DSEs soient celles du système réel. Les propositions

sont une famille d'hypothèses (choix des données préalablement retenues pour constituer des ensembles, prédicats de fonctions mathématiques, suppositions, connexion des éléments d'un modèle, extrapolations, ...) dont dépend intrinsèquement la qualité des Données Secondairement Elaborées, mais nullement les DICs. Elles seront détaillées au chapitre VI.

Les Données Initiales Contrôlées sont donc directement issues du champ écologique après un certain nombre d'hypothèses (options) réduisant considérablement notre connaissance par rapport à l'ensemble de l'information qui décrirait totalement ce qui est étudié par l'écologue (= l'écosphère). Les propositions sont des hypothèses qui d'une certaine façon tendent à suppléer à la carence des DICs par rapport à la réalité. Tout l'art des choix d'acquisition est de prendre des options aux faibles conséquences sur notre perception (= globalyse) du réel et l'art des interprétations est de retenir des propositions qui permettent opérationnellement une connaissance confrontable à la réalité dans l'écosphère. La pertinence plus ou moins grande des options (choix réductionniste des données objectives) et des propositions (hypothèses généralisantes de synthèse) doit pouvoir être appréciée face au réel.

8. Interprétations spéculatives et opérationnelles

Les interprétations sont des tentatives d'explication des faits. Concrètement des Données Initiales Contrôlées (DICs) sont commentées à la fois dans leur origine temporelle (évolution), dans leur organisation mutuelle (système) et dans leur prédictibilité du futur (prédiction).

La cohérence des systèmes écologiques conduit à de fréquentes démonstrations tautologiques, c'est-à-dire des propositions "toujours vraies" car contenant leur démonstration dans leur formulation. Celles-ci sont légions dans les discours naturalistes adaptatifs constatant qu'un être vivant a des caractéristiques (organes, gènes, enzymes, ...) adaptées au maintien de leur population dans leur milieu... ce qui revient à constater que les sous-systèmes vivants appartiennent à leur système écologique... ou sinon "seraient morts" : qu'un système ne se perpétue que s'il... se maintient. Si ces démonstrations et "preuves" de l'évolution (qui n'a pas à être démontrée car elle est synonyme d'écoulement du temps) n'apportent rien faute d'hypothèses opérationnelles (= faute de conséquences réfutables) ; elles tendent par contre à décrire une cohérence systémique qui n'est pas toujours perçue ou décrite *a priori* en raison de la complexité des systèmes écologiques (p. 97).

La complexité des systèmes écologiques conduit également à une explication opportuniste. Le jeu considérable des hypothèses possibles (et interchangeable) face aux maigres données objectives (DICs) prises en compte dans les études écologiques classiques, conduit à des choix opportunistes d'hypothèses (sans énoncer d'hypothèses concurrentes, par esprit "didactique" de clarté, ...) "acceptables" par la communauté (scientifique) comme vraisemblables. Toute donnée nouvelle inadéquate avec cet énoncé conduit soit au rejet de la donnée (lorsque la croissance en l'interprétation hypothétique est forte) soit à un nouvel énoncé "acceptable" susceptible avec un nouvel acquis d'une autre interprétation "acceptable". Le jeu des hypothèses étant très grand l'interprétation devient une succession d'exposés opportunistes de valeur prédictive nulle. Chaque événement conduisant à puiser pour "l'interpréter", dans une boîte à outils très riche, l'explication *ad hoc* (p. 26).

Opportunisme et tautologisme conduisent mutuellement à l'adoption d'énoncés à la fois évidents et généraux où tout peut être expliqué... mais pourrait de même être expliqué par toutes autres interprétations de même type.

L'opportunisme est souvent adopté face à la très grande complexité des systèmes écologiques qui fait que les élucubrations hypothétiques résultant d'accumulations d'hypothèses invérifiées sont si peu contrôlables que leur cohérence mutuelle (qui n'est pas évidente) prime sur leur réfutabilité. L'opportunisme n'a, comme les tautologies, aucune valeur opérationnelle démonstrative. Il constitue néanmoins souvent une tentative préliminaire de choix, parmi la myriade des

hypothèses possibles, de celles paraissant comme les moins mauvaises. De ce point de vue, les démarches opportunistes ne peuvent être écartées sans une prise en compte opérationnelle, au niveau des propositions d'experts (chap. VII).

Mais pour qu'une hypothèse, ou un ensemble cohérent d'hypothèses, soit opérationnel il faut qu'à partir de connaissances antérieures il permette de prédire des résultats non encore observés. Il faut qu'il y ait prédiction ; il ne suffit pas que la proposition soit vraie à partir des faits antérieurs (les hypothèses opportunistes suffisent alors) mais qu'elle se soumette au contrôle en prédisant des résultats (en produisant des prédictions) qui s'avéreront éventuellement faux.

Cette réfutabilité des hypothèses est théoriquement facile à concevoir. Sa pratique en science exacte est normale ; elle constitue même un test capital par exemple en physique théorique pour tester la relativité générale. En écologie, science dont les données initiales sont celles d'autres sciences exactes (physique, chimie, biologie), la réfutabilité des hypothèses relève fondamentalement de la même approche.

Mais pratiquement, opérationnellement, il en est tout autrement car

1) il ne s'agit pas tant, dans cette discipline proximale de l'homme, de tester par une expérience décisive une théorie (parmi des théories concurrentes) mais souvent de réfuter une myriade d'hypothèses par une multitude de contrôles,

2) il y a dispersion des moyens sur des thèmes académiques, ou des "modes" sans références explicites (aux hypothèses relatives) aux systèmes écologiques,

3) car les critères des sciences exactes sont inhabituels vis-à-vis d'études trop partielles par rapport au complexe où elles s'inscrivent (= poids du réductionnisme historique, p. 28).

11 en ressort que l'effort de synthèse (interprétation, chap. VI) joue un rôle décisif pour rendre scientifique l'écologie et que l'énoncé de prédictions explicites résultant d'interprétations antérieures devrait devenir le critère de validation même dans les systèmes écologiques complexes.

Dans les démarches écologiques, sont nécessaires des observations et des concepts abstraits. Ces derniers appartiennent opérationnellement à trois catégories : 1) les abstractions directement concrétisables (concepts d'unité directement applicable : un insecte, ..., concept de système appliqué en écologie au concret du champ écologique, ...), 2) les abstractions réfutables, constructions de l'esprit simples ou complexes pouvant être (in)validées sur le réel, les options, propositions et modèles jouent à cet égard un rôle essentiel, 3) les abstractions incontrôlables sont des fictions intellectuelles non réfutables : a-scientifiques, elles doivent être exclues de l'écologie.

Remarquons qu'il ne s'agit pas ici de se plier au carcan d'une "méthode" pré-existante quelconque mais de contrôler après un énoncé, dont la genèse peut avoir subi toute influence ou spontanéité, qu'une conséquence prédite d'une conclusion pourra vérifier effectivement cette conclusion. 11 s'agit de trier, dans le magma des affirmations, celles qui recouvrent le mieux une description des systèmes écologiques. La réfutabilité est essentielle au contrôle *a posteriori* et est indépendante de la méthode que d'aucuns réclament ou contestent (MORIN, 1985 ; FEYERABEND, 1979) ; une proposition réfutable n'a même pas besoin à l'instant d'être réfutée, simplement elle doit se prêter au contrôle.

1. 3.3. Formes et fonctions

1. Notion de caractéristique

Une caractéristique est un trait qualificatif, quantitatif ou flou, relatif à un organisme ou à son milieu. L'acidité du sol, le nombre d'animaux d'une espèce, le nombre d'espèces, la couleur de la feuille, la jeunesse, le taux respiratoire sont des caractéristiques.

Le mot caractère plus court, a été écarté en raison de son usage en informatique (écologique), une caractéristique étant décrite par plusieurs caractères

(nécessitant chacun par exemple 8 bits) ; le mot descripteur est, par ailleurs, réservé à la qualification des attributs en Base de Connaissances, un descripteur pouvant notamment être une combinaison quelconque de caractéristiques ou une classe des valeurs de l'une d'entre elles. Les caractéristiques sont des variables pouvant prendre plusieurs valeurs qualitatives, quantitatives ou floues.

Une donnée initiale décrite localement a trait à une caractéristique qui peut par contre engendrer plusieurs données (les valeurs du pH, la caractéristique étant le pi I du sol). Ces caractéristiques peuvent se rapporter à des états ou des cinèses qui elles-mêmes peuvent se rapporter à quatre interprétations : morphologique, cinétique, transformiste et morphofonctionnelle (p. 37) et s'exprimer en fonction des unités de la physique, de la chimie et de la biologie.

2. Etats et cinèses

L'observation de caractéristiques peut conduire à deux types de données initiales très différentes :

1) des qualités et des quantités présentes à un instant t (nombre de pierres, couleur de la feuille, poids du bétail, concentration en zinc d'un tronc d'arbre, etc.) ; il s'agit de caractéristiques liées à des formes ou structures, ou états. Nous les appellerons caractéristiques d'état. La durée est négligée : la caractéristique est alors instantanée et se rapporte à une date.

2) des débits et flux liés à l'une des caractéristiques, exprimées en fonction du temps dq/dt , par exemple nombre d'individus morts par seconde, quantité de CO_2 absorbée à l'heure. La donnée est liée à une durée (deux repères dans l'axe du temps). La valeur est fonction d'un temps. Nous appellerons cinèses les caractéristiques décrivant ces débits et flux.

L'observation écologique porte sur des états ou/et des déplacements (mouvements) d'objets, c'est-à-dire leur cinèse. Ces deux types d'observations sont de nature différente (fig. 1-2, fig. 1-4). Elles peuvent éventuellement être simultanées, mais doivent être très fondamentalement et très clairement distinguées, les méthodes mises en oeuvre et la signification des observations faites pour une cinèse ou un état étant totalement différentes. Tout un langage diffus, souvent confus, porte sur des caractéristiques ayant trait aux "activités, fonctions, textures, dynamiques, ..." il n'est pas à rejeter, mais doit être précisé pour éviter tout "glissement", toute transposition de faits, de concepts, et de synthèses hors de leur domaine d'application.

Cette remarque n'est pas mineure, de très nombreuses erreurs résultent par exemple d'estimations de cinèses, à partir de simples différences d'état, ce qui est illogique (p. 5 l).

L'accumulation de données sur des états à l'instant t est de la morphologie.

L'acquisition de données sur des cinèses pendant dt est de la cinétique écologique.

Le mot état est pris ici au sens strict "configuration des corps et des objets" mais aussi au sens plus large "toutes propriétés physiques de ces configurations" prises instantanément (durée = 0) (masse, volume de l'objet par exemple). Il s'agit de la somme des diverses propriétés que l'on sait enregistrer d'un objet observé, dans la pratique, dans un temps suffisamment bref et adéquat pour que les propriétés observées ne soient pas altérées en fonction de la durée d'observation.

Par un changement d'échelle spatiale on peut observer les composants d'un objet et la façon dont ils sont organisés en structures plus ou moins complexes, ou répétitives selon des textures différentes.

Les cinèses sont, à l'opposé des états, les observations sur les mouvements d'objets, quantité ou/et qualité changeant de situations spatiotemporelles. Ces phénomènes nécessitent des observations en fonction de la durée. Il s'agit de mouvements exprimant une quantité en fonction du temps, c'est-à-dire un débit (notations usuelles dq/dt ou $q.s^{-1}$; q = quantité en cause, t = temps, s = seconde).

L'une des propriétés de ce débit peut être une vitesse par unité de surface orientée perpendiculairement au vecteur vitesse (= un flux). Un flux ne porte pas sur des quantités mais sur des vitesses.

3. Relations entre états et cinèses

Les cinèses, mouvements des objets, modifient les états (les formes). Les formes, ou structures, étant l'organisation spatiale des états (fig. 1-3). Le dénombrement d'un troupeau dans un pré est modifié par l'arrivée (ou le départ) (cinèses) de quelques individus de ce troupeau dans le pré ; l'excrétion d'une substance hors d'un individu modifie sa biomasse (= son état biomasse) ; l'assimilation chlorophyllienne ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) accroît la masse végétale ; le lessivage d'un sol modifie sa composition, sa texture et sa structure, ...

Toutes ces modifications s'observent en deux temps, t_j et t_2 , entre lesquels des cinèses (parfois contradictoires) se produisent. Ainsi l'accroissement d'une biomasse résulte souvent de perte de biomasse (émanation hors de l'unité biologique observée) largement compensée par des gains. L'observation de deux formes différentes au temps t_j et t_2 n'indique rien sur les cinèses si ce n'est un bilan de l'ensemble de celles-ci entre t_j et t_2 . Nous retiendrons que, sauf exception, une série morphologique diachronique ne permet pas seule de mesurer des cinèses (fig. 1-4).

Les relations entre états et cinèses sont celles de systèmes (p. 91).

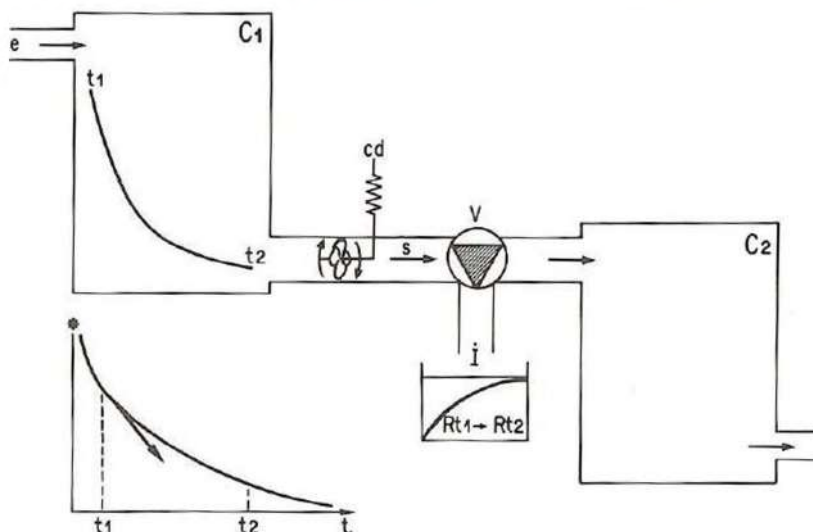


Figure 1-4 : Mesure des cinèses par modes dérivés. La cinèse entre deux compartiments C_j et C_{j+1} se fait : 1) par la dérivée analogique d'un capteur de débit, cd (anémomètre, aélimètre entre C_j et C_{j+1}), 2) par interception I (capture d'oiseaux au filet entre deux régions C_j et C_{j+1} , ■■■) dérivée par V dans une réserve pendant la durée $t_j - t_{j+1}$ ou, 3) par calcul de la dérivée de la fonction de dilution d'un marquage (*) des éléments (objets ou éléments chimiques marqués). Ce marquage est dilué par les entrées (e) et perdu par les sorties (s) entre t_j et t_{j+1} .

Un paradoxe systémique fréquent s'observe dans les systèmes biophysicochimiques : très souvent un compartiment important (en tant qu'état) aura des cinèses d'entrée et sortie modestes proportionnellement à sa taille, alors que le compartiment suivant, labile, recevant les éléments du gros compartiment les restituera (sortie) à un troisième compartiment rapidement. Le temps de résidence dans ce deuxième compartiment étant bref celui-ci est petit et le rapport cinèse/état est alors considérable. En d'autres termes, dans les systèmes écologiques les gros

compartiments (squelette minéral d'un sol, tronc d'arbre) ont des renouvellements souvent très faibles relativement à des compartiments minuscules associés à des cinèses entrées-sorties rapides, au point de devenir des compartiments transitoires de formes d'échange très labiles. L'importance d'un compartiment ne nous renseigne pas sur l'importance des cinèses associées à ses échanges et très souvent les compartiments importants témoignent de cinèses, relativement à leur taille, faibles ce qui est *a priori* paradoxal. Ces compartiments auront un rôle plutôt structural par opposition aux "petits" compartiments surtout fonctionnels. On peut définir le renouvellement d'un compartiment des entrées-sorties à l'équilibre $dq/dt = dq_s/dl$, comme le rapport $dq/Q \cdot dt$.

La difficulté fondamentale provient du fait que états et cinèses sont deux faces de la même pièce de monnaie. Les états interfèrent de deux manières avec les cinèses : a) en reflétant entre deux états différents une bilan de cinèses (Q change si dq/dt est différent de dq_s/dt), b) en décrivant une structure qui "contrôle" pour partie une cinèse.

L'abord simultané des états et cinèses mesurées, selon a) ci-dessus, et décrit en une organisation selon b) s'appelle étude des systèmes, ou systémique (fig. 1-2 et p. 96).

La forme commande, catalyse la cinèse : la texture sableuse (état ou forme) d'un sol permettra le débit des fluides (cinèse) et réciproquement l'intensité de l'anabolisme (cinèse) permettra l'élaboration d'une nouvelle tige (forme). A une autre échelle, un locus enzymatique (forme moléculaire) permet, dans des conditions définies, une réaction (cinèse) catalysée biochimique. Intellectuellement les deux aspects sont si liés qu'il n'est pas rare de voir un écologue prétendre mesurer une cinèse avec un outil de morphologie (c'est exceptionnellement possible).

En fait, la morphologie s'articule aux cinèses de deux façons différentes par les transformations et par la morphologie fonctionnelle qui tendent à apporter des informations indirectes, la première sur les conséquences des cinèses selon a) ci-dessus, tandis que l'autre suppose les potentialités des cinèses selon b) ci-dessus. Il est donc nécessaire de bien distinguer ces types d'interprétation écologiques présentés au paragraphe suivant.

1.3.4. Les types d'étude écologique et leurs pratiques

1. Types d'études

A. La statique ou morphologie

Comme nous l'avons vu (p. 44), cette étude porte sur des caractéristiques d'état à un instant donné : c'est typiquement le cas d'une description d'un profil de sol, d'une pression barométrique, d'une température, d'un nombre d'individus à l'hectare. L'organisation des états décrit des formes ou structures qui peuvent, être étudiées globalement ou analytiquement selon l'échelle temporospatiale et la composition adoptée (= niveau d'observation) (fig. 1-6).

B. La transformation.

Lorsque l'on compare en fonction du temps deux ou n états successifs, on constate la transformation (l'évolution ou le changement) intervenue entre L_j et t_2 (ou t_n). $Q_2 = Q_1 + (dq/dt - dq_s/dt)$.

Cette transformation n'est pas une cinèse mais un changement d'état (p. 44) ; en d'autres termes, il peut y avoir $Q_j = Q_2$ et entre t_j et t_2 d'importants échanges ($-dq_s$ compensés par $+dq_e$) tels que $dq_e - dq_s$ et quelles que soient leurs valeurs.

Au cours du temps t_1 à t_2 l'objet transformé peut s'être déplacé dans l'espace de sorte que la transformation se repère en fait dans l'espace-temps (souvent, comme ci-dessus, noté simplement t_1 et t_2).

Les mots dynamique, changement et évolution, sont opérationnellement quasi synonymes avec le mot "transformation" mais différent par leurs connotations.

La dynamique des phénomènes écologiques est souvent évoquée pour traduire des phénomènes complexes s'exprimant en fonction du temps : dynamique des populations, par exemple. Il s'agit de résultantes, fréquemment observées par une succession d'observations morphologiques diachroniques (fig. 1-2). Ainsi la dynamique d'une population entre le temps t_1 et t_2 correspond à la comparaison des dénombrements d'individus de cette population aux temps t_1 et t_2 . Il s'agit d'écologie morphologique, nullement d'écologie cinétique. Toutefois, comme déjà indiqué (p. 45) dans des circonstances très particulières, une telle dynamique peut traduire une cinèse. Notons que ces descriptions "en fonction du temps" traduisent toujours simultanément un phénomène spatial et sont en toute rigueur "en fonction de l'espace-temps" (st). D'une façon générale, en raison de la multiplicité des perceptions qu'en ont les écologues, j'utiliserai peu le terme "dynamique" : il traduit souvent la résultante complexe de divers processus fonctionnels confondant transformations et cinèses, deux processus de nature fondamentalement différente. Par contre, l'expression transformation - littéralement changement de forme - est non ambiguë et s'appliquera donc aux changements d'état (ou de forme) en fonction de l'espace-temps.

Transformation implique un changement d'état, donc de forme - mais celui-ci ne saurait se faire sans l'espace-temps. Changement est beaucoup moins formalisé en pratique écologique quoique s'appliquant en BLONDEL (1986) qui reprend le vieux concept que LAMARCK (1822) applique, par exemple, aux (paléo-)climats. Changement s'applique aussi en fonction de l'espace seul, tel le constat de changement de paysage sur un transect, il est un terme plus général que transformation car ne s'applique pas qu'aux formes (composition).

L'évolution, est comprise par les biologistes comme évolution biologique (depuis quelques milliards d'années) mais s'applique aussi à l'évolution cosmologique des systèmes astraux... et à l'évolution de tout système. L'expression souligne l'importance du temps dans les transformations, alors que dynamique évoqué ci-dessus, implique plus fortement les cinétiques sous-jacentes aux changements.

D'un point de vue opérationnel, tout changement d'état local implique une transformation, donc une évolution qui suppose une dynamique (faible ou forte). Transformation a une connotation sur les formes, dynamique sur les cinèses (à court terme ?), évolution (à long terme ?) et changement a un sens général flou... mais il s'agit toujours en fait de la même chose. Ces termes sont opérationnellement synonymes, même si en pratique et selon le contexte, une connotation culturelle peut y être associée. Toutefois, seul le terme transformation, par sa structure même porte sur les formes (ou états) et est non ambigu.

C. Lti morphologie fonctionnelle

Constatant une structure on peut en déduire par référence à une connaissance physiologique antérieure, la nature de la fonction probable de l'organe : une feuille verte a pour fonction de fixer par assimilation chlorophyllienne ; un poumon échange avec l'atmosphère... Cette interprétation très importante peut guider les travaux physiologiques à partir de cette proposition fondée sur une morphologie. Ce qui s'observe pour un organe s'observe pour de nombreuses autres structures descriptibles par des variables d'état : l'état bleuâtre d'un sol dû au fer Fe^{+2} indique souvent une hydromorphie du sol ou au moins une déficience en oxygène. La forme d'un bassin versant permet de prévoir les écoulements superficiels des eaux. L'étude morphofonctionnelle (= morphologie fonctionnelle) nous guide mais ne mesure jamais les cinèses : les commentaires fonctionnels issus d'analogies morphologiques ne donnent jamais respectivement aux exemples ci-dessus, le CO_2 fixé par des feuilles, l' O_2 exhalé par individu et par jour, les échanges électroniques conduisant au potentiel d'oxydoréduction du sol ou aux débits des cours d'eau.

La morphologie fonctionnelle constitue néanmoins un précieux outil de prédiction qualitative, moyennant des contrôles de cinèses. L'observation attentive des formes, des biogéocénoses, des animaux, des plantes et des sédiments... nous indique, souvent de façon détaillée, la nature des cinèses possibles, et aussi plus généralement les modalités fonctionnelles siégeant dans ces structures. Son rôle dans

l'interprétation, et surtout l'extrapolation est pragmatiquement considérable (p. 382), toutefois, il ne faut pas oublier qu'elle n'est qu'une interprétation hypothétique de potentialités qui peut par abus (fréquents) devenir dans certains esprits le résultat d'une synthèse prouvée.

D. Cinétique : cinèses et fonctions

Comme indiqué ci-dessus, une cinèse est la dérivée en fonction du temps dq/dt (taux respiratoire, débit d'une rivière à un instant donné, flux lumineux, mobilité à l'instant t , etc.) : l'étude des cinèses est la cinétique.

J'ai été tenté, et j'ai souvent utilisé fonction pour cinèse, car de nombreuses fonctions (= activités remplies par un être vivant, ou autres modifiant le milieu de ces êtres vivants) sont des cinèses. Une fonction excrétrice, une fonction assimilatrice d'un être vivant est une cinèse. Mais cette expression recouvre aussi des dynamiques : fonction de reproduction, au niveau d'une population, fonction biolytique au niveau d'une communauté ; fonctions régulatrices (souvent régulation de cinèse par un état).

En fait, le mot fonction - tel qu'il est défini dans les diverses disciplines concourant à l'écologie et tel qu'il est discuté par certains écobio-logistes (voir ci-dessous) - est particulièrement vague, assurément non univoque.

En biologie écologique (= écobio-logie, chap. III), c'est l'activité exercée par un être vivant, son rôle mais aussi les modalités d'action par lesquelles cet être vivant remplit son rôle. CALOW (1987) dans le premier numéro d'une revue dédiée à ce sujet ("*Functional ecology*") a récemment tenté de donner un contenu à ce qu'il appelle l'écologie fonctionnelle. En fait, il ne se réfère qu'aux organismes ayant des échanges trophiques considérés isolément ou en communautés ou en biocénoses. Dans cette discussion d'écobio-logie (p. 201), il y a à la fois une considération sur les activités, sur les modalités de production de ces activités et sur l'adaptation évolutive et génétique des organismes à ces activités, lesquelles peuvent être considérées par une approche comparative entre organismes (p. 241) ou par une approche spéculative (p. 96). BRADSHAW (1987a) répondant à CALOW (1987) insiste pour sa part sur le fait que les démarches comparatives, de toute façon, s'appliquent à un tel sujet. A aucun moment CALOW ou BRADSHAW n'abordent le fonctionnement des systèmes écologiques où, nous allons le voir (p. 63), l'intrication vie et non vie est si étroite que l'on ne peut considérer les fonctions à partir du seul point de vue biologique.

Il est à remarquer que pratiquement et donc opérationnellement, les études fonctionnelles et le mot fonction s'appliquent à la fois a) aux cinèses, b) à la régulation des cinèses et c) aux modalités de transformation des structures de régulation des cinèses. De ce point de vue, que nous retiendrons dans cet ouvrage, deux autres disciplines concourant à l'écologie utilisent ce mot au sens de "régulations des cinèses", à la fois en chimie (= substances ayant mêmes propriétés réactionnelles) et en mathématique (grandeur dépendant d'une ou plusieurs variables par une fonction = grandeur "régulée" par $f(x)$).

La physiologie étant la science étudiant le fonctionnement des organismes, l'écophysiologie peut être considérée à son tour sous deux angles. Celui "biocentrique" focalisant sur la régulation du fonctionnement des organismes par leur milieu ou celui du fonctionnement des systèmes écologiques tels qu'ils sont : bio-abiotiques. La première signification est incluse dans la seconde en ce sens que les organismes sont des sous-systèmes des systèmes écologiques (p. 63, 201).

Il ressort de cette revue que les mots fonction, écologie fonctionnelle ou écophysiologie ne peuvent être employés que dans un contexte étendu incluant les études cinétiques, leurs régulations et l'évolution des modalités régulatrices ; ils sont peu opérationnels par imprécision, car non univoques.

2. Processus potentiels et systèmes réels

Observer les systèmes écologiques conduit à décrire des changements d'état et si possible à observer certaines Cinèses. Il est souvent difficile de décrire ou de comprendre les cinèses essentielles expliquant les changements diachroniques et spatiaux d'état et les variables régulant ces cinèses (donc la dynamique des changements d'état).

On peut alors procéder, en isolant expérimentalement un processus, à l'étude de celui-ci pour en préciser la nature. Il est alors possible de voir l'interaction de quelques variables sur ce processus. On connaît ainsi un mécanisme qui potentiellement peut se développer dans le champ écologique et ceci aide à expliquer certaines variations d'état ou cinèses observées dans ce champ. Par exemple, on peut étudier le comportement migratoire d'un animal poïkilotherme dans un gradient thermique (thermopreferendum) ou encore l'influence d'un apport de glucose sur le dégagement de CO₂ d'un sol tamisé, etc. 11 s'agit d'études effectuées en conditions contrôlées artificielles dont les résultats dépendent des choix expérimentaux. Ces conditions artificielles sont hors-champ écologique et les résultats quantitatifs ainsi obtenus, n'ont que valeur qualitativement indicatrice dans le champ.

En raison des multiples interactions d'un nombre très élevé de variables et de l'existence de processus que l'on n'a pas décelé ni étudié, il n'est toutefois pas possible de connaître l'importance effective des potentialités (p. 31), c'est-à-dire la quantification des cinèses, dans le champ écologique. La réalisation et l'amplitude effective d'une potentialité dans les échanges doit être mesurés dans le champ écologique.

La réalité écologique (p. 31) du processus se développe dans le cadre des régulations multifactorielles des systèmes écologiques, les "facteurs" devenant alors des variables comme d'autres, contrôlées non plus simplement par l'expérimentation, mais par l'ensemble des interactions du système écologique étudié. La réalité écologique peut alors être fort différente de la potentialité et est, au plan opérationnel, seule écologiquement objective (cf. p. 21, l'exclusion opérationnelle). Les potentialités mises en évidence par les physiiciens, biologistes ou chimistes peuvent toutefois guider dans les choix des méthodes d'étude de la réalité écologique. S'il est parfois justifié d'entreprendre des recherches exploratoires sur les potentialités des mécanismes, une recherche écologique ne peut être considérée comme crédible que lorsqu'elle porte sur l'objet de cette science, les systèmes écologiques eux-mêmes. La crédibilité de l'écologie oblige à cette exigence élémentaire : porter sur son objet.

3. Types d'études et pratiques écologiques

D'un point de vue opérationnel, efficace, toute recherche écologique s'appuie sur des données, qu'il faut donc préalablement acquérir, après des choix hypothétiques, ou options et des interprétations en introduisant de nouvelles hypothèses liées à la synthèse par propositions. L'ensemble implique une série organisée de démarches élaborées - ou élaboration - (qui sera développée en 2ème partie) obligeant à l'acquisition des données (chap. IV), l'interprétation (chap. VI) et une gestion efficace des connaissances (chap. V) où les remises en cause permanentes obligent à une systémique écologique systématique (chap. VII) calquée sur les systèmes écologiques (p. 88).

Les types d'étude écologique sont très diversifiés en fonction des niveaux de perception choisis mais aussi suivant la propension à rechercher d'abord des potentialités ou d'abord des réalités écologiques. Ceci varie notamment en fonction du degré d'avancement des travaux ; par exemple, la réalité écologique étant bien perçue à un niveau d'observation il est possible de conduire des études exploratoires étudiant les potentialités du niveau inférieur avant, d'entreprendre son étude globalytique.

Toutes les études sont nécessairement associées à des observations et sont donc descriptives du système considéré. Elles peuvent porter sur un objet du champ

écologique intentionnellement manipulé par l'observateur - qui est alors un expérimentateur conduisant une expérience.

Les descriptions des expériences portent alors

1) sur les modalités expérimentales (les manipulations) choisies par l'expérimentateur qui, dans le champ écologique, modifie son cours normal par des actes (sans rôle de l'expérimentateur, c'est le témoin),

2) sur la description des portions du champ manipulé (ou observations) (et si nécessaire également non manipulé).

Plus l'importance des manipulations est grande plus le résultat dépend des actes, au point, que certaines études effectuées sans référence à ce champ peuvent ne plus indiquer dans leur description que ces options de manipulation.

Dans le champ écologique, opposer méthode expérimentale et observation est opérationnellement stérile ; reconnaître les actes (commandes) imposés par l'observateur au système étudié est par contre indispensable. Le fonctionnement des systèmes écologiques normaux, spontanés, mais dépendant de l'homme est l'objet de l'écologie mais l'expérimentation bien conduite permet souvent d'en comprendre certains mécanismes dans la réalité écologique.

A cet égard, il faut souligner que ces appréciations sur les types d'étude découlent de la signification de l'information écologique par rapport au champ écologique c'est-à-dire par rapport à l'objet de l'écologie. En omettant cette impérieuse référence, il n'est plus possible de distinguer les potentialités des réalités et le rôle opérationnel des premières par rapport aux secondes et bien d'autres classements sont alors possible tels ceux de Claude BERNARD (1856) qui, se plaçant dans la pratique du scientifique en général, distingue l'observation simple, de l'expérimentation, ou observation provoquée par l'observateur. De même GRIME (1979) privilégie certaines modalités d'interprétation en considérant

1) les recherches corrélatives ou recherches de corrélations entre variables (supposées expliquant les relations causales)

2) les recherches directes (= observations au sens de Cl. BERNARD) qui permettent l'interprétation de la végétation par rapport aux cycles biologiques (life histories) et des "dynamiques végétales"

3) les recherches comparatives sous conditions standardisées. Il s'agit alors d'une modalité expérimentale particulière. Ces modalités sont d'ailleurs a-écologiques, la standardisation des conditions s'opposant à la variabilité des conditions normales du fonctionnement de chaque plante.

Nous pourrions multiplier ces exemples. Les acquis de l'écologie portent sur une partie du champ écologique de l'écosphère. Ces données correspondent aux données directes au sens de Grime (1979), ce qui n'exclut pas toujours une approche expérimentale lorsque le chercheur agit par actes connus sur le système écologique en cause. Ceci n'évite jamais les hypothèses (options et propositions) comme étapes indispensables de l'interprétation avant validation (vérification, réfutation).

Les études comparatives (ou comparaisons) portent, tant sur des données d'observation comparées dans l'espace ou dans le temps, que sur des résultats expérimentaux et que sur la validation de modèles synthétiques par rapport à la globalité qu'ils visent à représenter. Les comparaisons visant souvent à distinguer le degré de similarité (identité) ou de différences des éléments comparés. De ce point de vue toutes les études sont comparatives, ce qui explique l'attitude de BRADSHAW (1987b) répondant à CALOW (p. 48). Ce terme sera réservé ici aux interprétations qui visent directement, ou d'abord, ou surtout, à une comparaison, ce qui n'est pas le cas du long processus de modélisation systémique (p. 390) où la comparaison au global n'est que relative et très tardive. Certains auteurs tendent par ailleurs à réserver le terme d'écologie comparative aux études comparant des modalités quasi-synchroniques par opposition aux études "évolutives" qui portent sur la transformation diachronique des systèmes. Comme toutes les transformations sont spatiotemporelles, ces distinctions ne sont que des commodités pour privilégier certains points de vue.

Les études comparatives conduisent à une similarité ou différence, relativement grande, conduisent aux classifications usuellement organisées en hiérarchies qui portent sur tout ou partie des systèmes écologiques (p. 91).

L'information écologique étudiée dans les études comparatives n'oblige pas à la connexité systémique (relation effectivement connue entre compartiments et cinèse) mais seulement à la connaissance d'un nombre suffisant de données relatives à des caractéristiques descriptives des objets comparés (p. 93).

Les études systémiques (ou systémique) visent à décrire les systèmes écologiques système par système, c'est-à-dire par petites unités où les compartiments sont mutuellement en connexités systémiques par des cinèses d'échange de matière-énergie expliquant les changements d'état des compartiments. Les systèmes sont mutuellement connectables si nous avons la preuve de leur connexité ; chacun intègre deux niveaux d'observation : les composants systémiques (compartiment et cinèses) et le système lui-même (p. 91).

Dans la pratique, nous mettons en oeuvre des observations morphologiques ou/et cinétiques. Les premières sont des observations-descriptions constituant vis-à-vis des phénomènes des photos "instantanées" qui peuvent être composées dans l'espace en considérant que le temps de prise des photos ne joue pas de rôle (mode synchronique) ou au contraire composées en fonction du temps (mode diachronique) (fig. 1-2). Les études cinétiques se feront par un mode dérivé, dérivation par interception d'une substance émise par un objet (absorption du CO₂ exhalé, mesure de la pluie dans un pluviomètre, collecte des chutes de litière, etc.), dérivée mathématique dq/dt pour exprimer un débit (fig. 1-4, p. 45). Le premier stade de ces observations est descriptif : on décrit les faits ; le deuxième stade est interprétatif par rapport à la morphologie diachronique : on décrit le fonctionnement, entraînant un changement de formes et de systèmes considérés et reliant les causes aux effets.

On peut arbitrairement isoler l'action d'un objet sur un autre, le premier est dit cause, le second effet. En écologie synthétique, les relations causes/effets analysés entrent dans des systèmes (p. 91) où un effet résulte de plusieurs causes et une cause entraîne plusieurs effets et où les effets rétro-agissent sur une cause (p. 98).

L'interprétation fonctionnelle, ou écophysiologique, porte sur des cinèses, des transformations et sur des comparaisons morphologiques. Séparément ou simultanément, elle s'applique aux diverses échelles temporospatiales (adaptation d'une caractéristique d'un individu contrôlé par un gène à un milieu précis ; expression de l'effet des climats sur l'ensemble des formes d'un écorne (par exemple, toundra) ou d'un écosystème local (par exemple, tourbière). Si intellectuellement nous ne parlons pas simultanément des états et des cinèses, le fonctionnement de l'ensemble entraîne à la fois modification des formes et régulation par les formes des cinèses. Réciproquement, toute interprétation d'une forme nous donne une opinion sur les causes ayant conduit à cet état (évolution) et sur les processus cinétiques qui peuvent se dérouler dans celle-ci (interprétation morpho-fonctionnelle, p. 47). Les états canalisent les cinèses et les cinèses modulent les états.

Les modalités majeures des études écologiques portent donc à partir des données à des interprétations statiques, cinétiques, morphofonctionnelles et transformistes qui peuvent être organisées en comparaison (conduisant à des hiérarchies cumulatives) et en systémiques condensant (résumant) la connaissance.

L'écologue se doit, malgré sa spécialisation, de pouvoir manipuler intellectuellement les divers concepts issus de ces approches, s'il veut pratiquer sa science (science globale) correctement. Il ne peut se faire l'économie d'une connaissance suffisante des acquis de la physique, de la chimie, de la biochimie et de la biologie ; acquis décrivant les propriétés potentielles et les contraintes auxquelles sont soumis les êtres vivants dans leurs milieux. Nous allons en conséquence reprendre point par point ces bases générales de l'écologie afin d'en dégager les traits essentiels puis particuliers.

1.4. Propriétés fondamentales matière-énergie

1.4.1. Introduction

L'étude de l'infiniment petit - en physique nucléaire - ou celle de l'infiniment grand - en cosmologie - ne sont pas objets d'étude pour les écologues, bien au contraire comme nous l'avons déjà indiqué l'écologie est la science proximale de l'homme. Les diverses sciences exactes apportent une connaissance sur la matière, ou plus exactement la matière-énergie, dont les propriétés régissent la diversité physique, chimique et biologique de l'écosphère. L'objet d'étude de l'écologie, l'écosphère, est constitué de matière-énergie et en conséquence a les propriétés fondamentales de celle-ci.

Il n'y a pas présentement de théorie unificatrice acceptée recouvrant l'ensemble des propriétés de la matière-énergie mais une série de propositions convergentes reconnaissant entre matière et énergie d'une part, une identité ($E = mc^2$) et une diversité des états, et d'autre part des niveaux d'interactions dans la matière qui peuvent être (selon l'expression la plus classique) groupés en 4 niveaux d'interactions entre constituants de la matière (tableau 1-2).

- 1) Les interactions fortes qui assurent la cohésion des noyaux atomiques.
- 2) Les interactions faibles qui sont révélées, notamment, par la désintégration des noyaux.
- 3) Les interactions gravitationnelles ("La pesanteur") qui constitue, outre la régulation des mouvements des astres, une force physique constante jouant dans l'écosphère un rôle essentiel.
- 4) Les interactions électromagnétiques qui jouent le rôle prépondérant dans la cohésion/incohésion des systèmes chimiques, biochimiques et biologiques, c'est-à-dire dans les systèmes écologiques.

L'écologie n'a pas à prendre en compte les interactions fortes dont le niveau d'énergie liant les éléments nucléaires est si élevé que leurs événements naturels dans l'écosphère sont rares.

Les interactions faibles (terme 1^{er} relatif, au niveau de l'écosphère ; il s'agit en fait des interactions les plus agressives et les plus puissantes que l'écologue peut prendre en compte) sont objets d'étude écologique, 1) parce que les désintégrations des noyaux sont source de particules énergétiques traversant plus ou moins profondément, et plus ou moins puissamment, les systèmes écologiques en les modifiant, 2) au plan appliqué, en raison de l'accroissement de produits fissiles d'origine industrielle (nous les aborderons sommairement au chapitre VIH) enfin. 3) au plan technique, en raison de l'importance des radio-isotopes comme traceurs utiles à l'étude de systèmes écologiques.

Les interactions gravitationnelles constituent pour l'écologue des forces constantes qui marquent fondamentalement le fonctionnement vertical de l'écosphère, au point d'en orienter les modalités d'étude (notion de pieu, p. 131).

Les interactions électromagnétiques régissent étroitement l'essentiel des lois physiques que l'homme peut maîtriser, moduler et qui sont également celles des électrons. Leur étude sera abordée au niveau général (p. 53) puis au niveau plus spécifique des liaisons chimiques et de la thermodynamique avant d'envisager le domaine restreint de leur fonctionnement dans les échanges biologiques sophistiqués (cf. aussi p. 64).

Ces propriétés physicochimiques essentielles étant décrites nous reviendrons sur les interactions plus fortes - gravitationnelles puis interactions nucléaires "faibles" (p. 61) dans le champ écologique.

INTERACTIONS	MANIFESTATIONS
<i>Fortes</i>	Structures atomiques
<i>Faibles</i>	Emissions ($1 \rightarrow$ hélium He^+) Emissions fi électron e^- Emissions γ positon e^+ Emissions γ —• rayons X
<i>Gravitationnelles</i>	Pesanteur
<i>Electromagnétiques</i>	
1) structure électronique	Liaison chimique : covalente Charge : ionique "Chaleur de réaction" : métallique
2) interactions de Van der Waals	
2a) polarisation électronique	pression, volume, $PV = nRT$ chaleur latente, changement de phase
2b) dipôles électriques	liaison hydrogène, hydrophilie, lipophilie, organisations biomoléculaires

Tableau 1-2 - Les interactions physiques de la matière-énergie et ses principales manifestations ordonnées en énergies décroissantes

1.4.2. Les interactions électromagnétiques

1. Structure atomique

La structure atomique découle des propriétés des atomes c'est-à-dire de leur constitution matière-énergie. Rappelons que celle-ci est décrite essentiellement à l'aide de trois particules : les neutrons et protons (dénommés collectivement nucléons) et les électrons. Les nucléons constituant le noyau et l'essentiel de la masse atomique dont le nombre est indiqué après le symbole chimique de l'atome : exemple ^{15}N signifie isotope de l'azote de masse atomique proche de 15. La masse la plus faible, celle de l'hydrogène servant initialement d'unité. Ce fut par la suite celle de l'atome d'oxygène environ 16 fois supérieure qui a été retenue comme référence standard (où $O = 16$). L'hydrogène est le cas le plus simple d'atome constitué d'un noyau réduit à un seul proton (de charge conventionnellement positive) et d'un électron (de charge opposée, donc négative). La masse de l'électron γ est faible (1/1840ème de celle de l'atome d'hydrogène). Le proton est chargé positivement, l'électron négativement, le neutron n'a pas de charge électromagnétique. L'atome est neutre lorsque les nombres d'électrons et de protons sont égaux.

Si la masse des électrons est faible, leur volume - ou plus exactement le volume de leurs orbitales (orbites de déplacement) autour du noyau - est considérable. La masse principale des noyaux regroupe les nucléons (celle du neutron, de charge électrique neutre, est voisine des protons) mais n'occupe qu'un volume "subsphérique" de diamètre de l'ordre de 10^{-13} cm tandis que celui de l'atome - incluant l'espace parcouru par les électrons - est de l'ordre de 10 cm. Grossièrement, la masse électronique, 1000 fois plus faible que le noyau, parcourt un volume 100 000 fois plus grand.

Certains isotopes sont peu stables (= le noyau se décompose) et changent de nature chimique et nucléaire par une réaction nucléaire affectant la nature du noyau (p. 61 : la radioactivité) mais de nombreux isotopes sont, au niveau de l'écosphère, stables et sont présents dans la nature en une proportion plus ou moins constante.

Le nombre de protons donne le numéro atomique auquel est attribué, pour chaque numéro, un nom d'élément chimique (n° 1 = Hydrogène) car les propriétés chimiques de la matière découlent de ce nombre de protons (= d'électrons à la neutralité des charges). Des atomes de masse différente (en raison des neutrons) mais de même nombre atomique (même nombre de protons) sont les isotopes du même élément chimique.

L'étude fine des éléments chimiques montre que selon les isotopes leur masse atomique étant différente une séparation isotopique partielle se produit, au niveau de certains processus physiques (changement de phase, mouvements, ...). Cette séparation est quantitativement très faible, mais toutefois mesurable par spectrométrie de masse. Par exemple, le rapport isotopique naturel de l'oxygène est respectivement de 99,76 %, 0,04 % et 0,2 % de l'oxygène total pour les isotopes ^{16}O , ^{17}O et ^{18}O . Mais les mesures fines en spectrométrie de masse montrent que vers la 5ème décimale les rapports isotopiques changent de valeur sous l'effet d'interactions électromagnétiques très faibles (du type forces de Van der Waals, p. 58).

Il est d'usage de noter ces faibles variations isotopiques par une différence par rapport à un standard et de l'exprimer en pour mille. Pour l'eau par exemple, le rapport grossier $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ est celui indiqué ci-dessus soit 0,001. Le delta-O est :

$$\text{delta-O} = \left(\frac{^{18}\text{Oe}/^{16}\text{Oe}}{^{18}\text{Os}/^{16}\text{Os}} - 1 \right) \times 1000$$

où Oe désigne l'oxygène de l'eau d'un échantillon et Os celui du standard (ici celui de l'eau de mer). Une variation de 1 pour mille du delta-O représente une modification dans ce cas de 2 à la 6ème décimale soit 2 ppm.

Cette notation en delta isotopique est employée pour toutes les différences isotopiques faibles. Une molécule d'eau avec H_2^{18}O est plus "lourde" que H_2^{16}O et son évaporation va conduire à une ségrégation : la vapeur d'eau aura en général un delta-O de -10 (rappelons : par rapport au standard, l'eau de mer).

Le fractionnement isotopique devient pour l'écologue un moyen de plus en plus fréquemment mis en oeuvre pour suivre certains éléments ainsi caractérisés par une composition isotopique fine détectable (les delta-N pour le rapport $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ et delta-C pour $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ sont, avec les delta-O, de plus en plus utilisés). Il s'agit de véritables traceurs naturels d'autant plus précieux que leur usage en systématique permet d'annuler ou minimiser les perturbations des systèmes écologiques étudiés (p. 274).

2. Structure électronique

Si le noyau est solidement agencé par des interactions fortes et moins solidement par des interactions faibles, les électrons ne sont liés à l'atome que par des énergies beaucoup plus faibles, dites électromagnétiques. Leur disposition et leur liaison relatives à l'atome vont conférer à la matière l'essentiel des propriétés physiques et chimiques constitutives des systèmes écologiques. Nous nous y arrêterons donc un peu.

Rappelons d'abord que le volume du noyau est infiniment plus faible que celui de l'atome qui est pratiquement occupé par les électrons. Ceux-ci sont représentés comme parcourant statistiquement des ellipses autour des noyaux en ayant par ailleurs une rotation (spin) sur eux-mêmes dans l'un ou l'autre sens. Les électrons sont ainsi caractérisés par des positions géométriques (distance moyenne des orbites aux noyaux, excentricité des ellipses, spin) qui s'expriment par quatre nombres, dits nombres quantiques.

Ceux-ci reflètent les diverses forces électromagnétiques qui s'exercent sur eux (notamment répulsion entre électrons, et attraction des protons du noyau). Leur distribution statistique dépend de ces interactions qui conduisent à une propriété générale exprimée par le principe d'exclusion de PAULI « il ne peut y avoir sur une orbite (un champ d'ellipse) plus d'un électron caractérisé par les mêmes nombres quantiques ». Il ne peut y avoir plus de $2n^2$ électrons de nombre quantique n (= couche d'ellipse). Donc la première orbite ($n = 1$) sera saturée par $1.1^2 = 2$ électrons (c'est le cas de l'hélium), la deuxième par $1.2^2 = 8$ électrons (c'est le cas du néon ($2 + 8 = 10$ électrons), etc.

Les divers éléments chimiques sont ainsi classables en fonction du nombre d'électrons (= nombre de protons) qui sont situés sur leurs diverses couches électroniques (notées de l'intérieur à l'extérieur, K, L, M, N...). Le nombre d'électrons saturant plus ou moins la couche externe caractérisent les propriétés chimiques de ces atomes, cette couche n'étant pas nécessairement saturée, puisque le nombre total d'électrons d'un atome, à l'équilibre des charges, dépend seulement du nombre de protons.

Lorsque la couche externe est saturée, il y a non affinité chimique, ce qui est le cas des gaz rares (hélium, néon, krypton, ...). Ceux qui ont à l'équilibre de charge un seul électron sur la couche externe seront les métaux alcalins (sauf le premier : l'hydrogène gazeux) (lithium, sodium, potassium), ceux ayant deux électrons seront dits alcalino-terreux (béryllium, magnésium, calcium, ...) ; ceux manquant d'un électron pour saturer la couche seront dits métalloïdes monovalents (francium, chlore, brome, iode, ...), etc.

Ces différentes classes d'éléments définies par la saturation relative de leur couche externe auront souvent des propriétés chimiques voisines car les liaisons chimiques tendent à associer les atomes de telle sorte que ces associations, mettant en commun des électrons saturent la couche externe de chacun des atomes associés. Ces similitudes de propriétés sont ordonnées selon un tableau dressé initialement par Mendeleiev.

Un changement de position d'un électron dans l'atome (changement de niveau du premier nombre quantique, relatif aux orbites, soit K, L, M, N) entraîne un échange d'énergie sous forme d'un quantum d'énergie $h\nu$ ou h est la constante de Planck ($= 6,62.10^{-34}$ J/s) et ν la longueur d'onde (si l'on exprime ce quantum sous forme "ondulatoire"). Il y a émission d'énergie si l'électron se rapproche du noyau (de M vers L par exemple) et absorption d'énergie dans le cas inverse. Sous un rayonnement radiatif (réception de quanta) les atomes peuvent être excités (électron délocalisé vers l'extérieur) voire ionisés (perte d'électrons, ou acquisition d'un électron surnuméraire entraînant une charge électrique de l'atome + ou - selon qu'il y a perte ou gain de l'électron).

Lorsqu'un électron change de couche externe, pour venir vers une couche interne, il émet l'énergie sous forme d'une radiation corpusculaire (photon) dont la longueur d'onde dépend de l'énergie $U = h\nu$. Plus un corps est chaud, plus il émet vers une fréquence élevée (un corps froid émet dans l'infrarouge, en chauffant il passe dans le rouge (visible à plus courte longueur d'onde. Un corps peut (cela dépend de ses propriétés physico-chimiques) absorber des photons (il y a excitation des électrons et agitation atomique ou moléculaire) ou émettre ceux-ci. L'énergie $h\nu$ décroît donc avec la longueur d'onde du rayonnement en cause et cette longueur d'onde est très variable allant de très petites longueurs d'onde picométriques ($K \cdot 10^{-12}$ m) des rayons gamma, nanométriques (10^{-9} m) des rayons X, micrométriques pour les rayons visibles et

pioches du visible, les rayons hertziens allant du millimétrique à au-delà du kilométrique.

Les atomes et surtout leurs assemblages en molécules ont des électrons plus ou moins stabilisés par leurs protons. Selon leur configuration électro-protonique, ils seront sensibles à certaines longueurs d'ondes coïncidant avec des niveaux énergétiques d'excitation (= absorption) ou inversement émettront à certaines longueurs d'ondes par désexcitation.

Une configuration chimique moléculaire quelconque sera donc caractérisée par son spectre d'absorption (dans une zone de longueurs d'onde) et son spectre d'émission (dans une autre zone de longueurs d'onde). Cette émission dépend de son état d'excitation lié à la température (p. 48).

L'importance des rayons visibles ($0,4$ à $0,8 \cdot 10^{-6}$ m) et infrarouges (10^{-3} à 10^{-6} m environ) dans les transmissions d'énergie de l'écosphère est considérable tandis que les rayons infravertibles (ultraviolets, X et gamma) ont surtout des conséquences biologiques délétères et un rôle photochimique atmosphérique important.

3. Les mouvements d'électrons : liaisons chimiques et charges

Comme déjà signalé ci-dessus, dans le cas le plus général le nombre de protons ne coïncident pas avec le nombre d'électrons et les propriétés chimiques de la matière en découlent (pour l'oxygène ^{16}O , par exemple, 8 indique le nombre d'électrons dont dépend essentiellement les propriétés chimiques et 16 les nucléons dont dépend essentiellement la masse).

Ainsi l'hydrogène H^0 n'a qu'un électron (sur la 1ère couche qui peut en recevoir 2) ou le lithium (3 protons) n'a à l'état Li^0 que 3 électrons, deux saturent la 1ère couche et le 3ème est "esseulé" sur une couche pouvant en recevoir 7 autres. Comme l'hydrogène, le lithium perd facilement cet électron externe "esseulé" pour devenir un ion (Li^+). Ceux-ci peuvent être plus nombreux comme dans l'ion calcium Ca^{++} également un cation. On note conventionnellement (-) un électron en excès et (+) un électron manquant.

A l'inverse, certains autres éléments tendent à avoir les couches externes à la neutralité électrostatique presque complète c'est le cas du fluor (9 protons) qui sature sa première couche (= 2) et presque totalement la 2ème (saturée à 8) avec les 7 électrons restant qu'il possède à l'état neutre (F^0). Il tend à capturer un 10ème électron et devient alors un ion chargé négativement (excès d'électrons par rapport aux protons, mais couche complète) F^- , ces ions négatifs, qui peuvent avoir plusieurs charges négatives tels l'oxygène O^{--} (noté aussi O^{2-}) sont dénommés anions.

Mais ces considérations se font sur des atomes isolés dans l'espace, qui en quelque sorte "résolvent" ou bien leur saturation des couches externes, ou bien leur équilibre électrostatique (rapport protons/électrons = 1). Dans la nature, ces atomes sont à proximité d'autres atomes et les électrons étant peu liés spatialement à la structure atomique peuvent être "partagés" par leur position intermédiaire orbitant pour satisfaire à la fois la saturation des couches et la neutralité électrostatique des atomes les partageant. Ainsi l'hydrogène (1 proton) peut s'associer au fluor pour former un ensemble de 10 protons, qui se repoussent (même charge) et restent séparés en 2 noyaux (1 et 9 protons) mais partagent un nuage électronique où l'hydrogène apporte le 10ème électron manquant au fluor pour saturer la couche externe (L) du fluor et le fluor un électron pour saturer la couche externe (K) de l'hydrogène. S'il y a rupture, l'hydrogène peut s'écarter en ayant perdu son électron sous forme d'un proton seul (H^+) et le fluor comme un anion (F^-) ayant un électron supplémentaire (il y a deux ions : H^+ et F^-). Lorsqu'ils ne sont pas écartés il y a liaison chimique.

La façon dont les liaisons chimiques sont organisées n'est pas quelconque puisque

1) elle dépend de la localisations des nuages électroniques et des interactions des électrons avec les protons de leur voisinage : le voisinage le plus immédiat étant le plus fort. Parfois aucun voisinage ne joue de rôle prépondérant dans ce cas les

élections sont "délocalisés" et peuvent circuler entre les noyaux (— conductibilité électrique),

2) elle dépend des répulsions entre noyaux plus ou moins chargés de protons. La nature des liaisons chimiques et de l'organisation des associations d'atomes, appelées molécules, en dépend,

3) elle ne dépend pas des neutrons. Il est possible avec les mêmes propriétés protoniques et électroniques donc les mêmes éléments chimiques (hydrogène, oxygène, azote, iode...) d'avoir un nombre variable de neutrons. Ces neutrons chargent plus ou moins le noyau en masse mais n'affectent pas les propriétés électromagnétiques. Comme nous l'avons vu, on nomme isotope les diverses formes de masse différente mais de charge protonique identique - et éléments chimiques ceux de charges protoniques différentes.

Des atomes, qui complètent leur nuage électronique en se rapprochant, peuvent prendre différentes situations.

Soit il y a mise en commun "durable" entre deux atomes ($2H^V + 0^0 \rightarrow H_2O + U$, l'eau) : il y a liaison covalente (U = énergie dégagée).

Le nombre de liaisons qu'un atome peut avoir dépend du nombre d'électrons qui saturent partiellement sa couche externe, par exemple le carbone peut "recevoir" pour saturer sa couche externe (L) 4 électrons, l'azote 3 électrons et l'oxygène deux électrons. Ils peuvent se lier avec des éléments apportant 1 électron, tel l'hydrogène qui forme respectivement le méthane CH_4 , l'ammoniac NH_3 et l'eau ! (O). On dit ces éléments respectivement tétra-, tri- ou bivalents. Deux atomes bivalents du même élément peuvent former une association tel O_2 . Ces associations en molécules peuvent devenir extrêmement complexes dont la configuration en chaînes $-CH_2-CH_2-CH_2-$.

Mais dans d'autres cas, il y a pratiquement association continue et mise en commun d'électrons ; c'est la liaison métallique dans laquelle les noyaux d'atomes s'organisent en réseaux et les électrons sont partagés, "mis en commun", de façon délocalisée entre les atomes. Ils peuvent se déplacer sous l'effet d'un champ électromagnétique.

Dans certains cas enfin, la liaison entre atomes a un caractère lâche, essentiellement dans des liquides, mais aussi parfois dans des solides laissant des "vides". Des atomes ou des molécules peuvent se séparer après échanges des électrons saturant les couches mais en déséquilibrant la charge totale par excès d'électrons (H^-) ou acquisition (E^+) par exemple par dissociation dans l'eau de l'acide fluorhydrique (FH). On parle de liaison ionique pour ces liaisons lâches se dissociant en ions (ici H^+ et F^-). La proportion de H^+ libérée mesure l'acidité d'une solution. Plus la dissociation en H^+ est fréquente plus l'acidité est élevée : un acide fort est totalement dissocié

Notons qu'en solution aqueuse l'ion H^+ réagit avec l'ion OH^- pour former de l'eau ($H^+ + OH^- \rightleftharpoons H_2O$). On exprime dans celle-ci le niveau de concentration de l'ion H^+ par le pH qui est l'inverse du logarithme de cette concentration ($pH = -\log [H^+]$) ; plus le pH est bas, plus la dissociation est totale (acide fort : $pH = 1$), plus il est élevé, plus elle est faible du fait de la teneur en autres cations (base forte : $pH = 14$). Les solutions, les solides et les portions de molécules à fortes charges Π sont dits acides et ceux à fortes charges négatives (tel OH^-) sont des bases (ou alcalins). L'eau est à la fois une base et un acide car elle se dissocie faiblement $H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^-$ (avec $[H^+] = [OH^-] = 10^{-7}$ à $20^\circ C$).

Il y a entre les trois types de liaisons chimiques (ioniques, covalentes et métalliques), commodes pour exprimer la plupart des propriétés des situations intermédiaires.

Une molécule n'existe de façon stable que si son énergie est plus basse que celle de l'ensemble des atomes (pris séparément) qui la constituent. La formation d'une liaison chimique libère donc une certaine quantité d'énergie, dite énergie de liaison. Pour dissocier cette liaison il faut fournir une énergie au moins semblable à la précédente. Une réaction chimique (et donc biochimique) est une réaction qui joue

un certain nombre de liaisons et utilise (une part de) l'énergie ainsi libérée (ou absorbée) pour en rompre d'autres. Le bilan énergétique de l'ensemble des réactions de rupture et d'association est la bilan de la réaction. Dans certains cas, ce bilan est positif, la réaction fournit de l'énergie dont de la chaleur (2ème principe de thermodynamique, p. 64) ; elle est dite exergonique). Dans d'autres cas, elle absorbe de l'énergie ; la réaction est alors dite endergonique). Une augmentation de température traduit un accroissement de l'énergie cinétique de l'ensemble (= dilatation des liquides, solides et gaz).

4. Changements de phase et Liaison hydrogène : forces de Van der Waals

La cinétique chimique est la discipline étudiant la vitesse des réactions. Ces réactions dépendent fondamentalement des "affinités" des éléments en cause (mode de liaison, énergie de liaison, etc), de la concentration des éléments dans le milieu (= probabilité de rencontre) et de la température (= agitation permettant ces rencontres). Dans un espace complexe, elles peuvent être favorisées (ou défavorisées) par la structure de celui-ci mettant les éléments réactifs en présence (ou les isolant). Cette structuration spatiale joue à toute échelle, telle la richesse ou la pauvreté d'un sédiment en un élément, tels les vaisseaux transportant les solutés dans une plante, tel le réticulum endoplasmique des cellules, telles les configurations atomiques ou moléculaires environnantes. Dans ce dernier cas, on parle de catalyseur accroissant la probabilité (vitesse) d'une réaction (= enzyme dans les systèmes biochimiques). Les réactions peuvent être réversibles ou irréversibles selon leur nature (liaisons, bilan énergétique).

Entre molécules, il existe des interactions beaucoup plus faibles que celles qui prévalent dans les liaisons interatomiques formant les molécules. L'énergie de ces liaisons intermoléculaires est environ 100 fois plus faible que dans les liaisons covalentes. Ce sont les liaisons de Van der Waals ; elles mettent en jeu deux processus : la polarisation du nuage électronique des molécules et la présence de moments dipolaires.

1) La polarisation des nuages électroniques est un phénomène général et quantitativement important. Lorsque deux atomes ou molécules se rapprochent, il y a répulsion des électrons : ceux-ci tendent à s'écarter de leurs atomes ou de leurs noyaux organisés en molécules : il y a polarisation. Cette polarisation est d'autant plus difficile que l'électron est associé étroitement à l'atome ou à la molécule, c'est-à-dire appartient à un petit ensemble.

Sous l'effet de forces générales telles les forces gravitationnelles, les molécules sont pressées (pression) les unes contre les autres ; ces forces jouant, les petites molécules garderont dans les mêmes conditions une indépendance très grande (gaz) ou relative (liquide), pour les moyennes, tandis que les plus grosses s'organiseront en un Système stable (solide). A des conditions comparables de pression, par exemple celles prévalant à la surface de la terre, de petites molécules seront des gaz (e.g. O_2 , N_2 de l'atmosphère ou le méthane CH_4 , éthane CH_3-CH_3 , butane $CH_3-CH_2-CH_2-CH_3$) des moyennes seront en phase liquide (tel l'octane C_8H_{18}) enfin des relativement grosses seront constituants des solides (goudrons).

En augmentant l'agitation, c'est-à-dire l'énergie cinétique des constituants (apport énergétique : la température augmente) il y a liquéfaction des solides et volatilisation des liquides. En augmentant la pression (P), ou en baissant la température (T), on obtient l'effet inverse (loi de Mariotte-Boyle, $PV = RT$, où R est un coefficient et V le volume).

Les changements d'état qui, modifiant le niveau des forces de Van der Waals, incorporent ou libèrent relativement beaucoup d'énergie ; il peut y avoir simple dilatation des substances (moyen utilisé pour mesurer la température).

L'énergie emmagasinée sous forme d'énergie cinétique par les cinèses des molécules et atomes est la quantité de chaleur. Un apport de chaleur (d'énergie cinétique) accroît ces mouvements qui sont nuis (énergie cinétique nulle) au zéro

absolu. On exprime donc logiquement les propriétés thermodynamiques par référence à cet état nul en "température absolue" (ou degré de Kelvin, $^{\circ}\text{K}$, de même dimension que le $^{\circ}\text{C}$, est toujours positif, $0^{\circ}\text{K} = -273,16^{\circ}\text{C} = \text{zéro absolu}$).

Les rapports entre chaleur, température, volume, pression et énergie chimique (de liaison) des corps relèvent de la thermodynamique (p. 65). La quantité de chaleur (ou d'énergie) s'exprime en Joules (la calorie = 4,18 J est aujourd'hui abandonnée). Elle s'applique à la chaleur spécifique, variable selon les substances ("capacité" d'accumuler sous forme cinétique comme vu ci-dessus : quantité de chaleur accumulée par 1 g de substance entre 15°C et 16°C), la chaleur latente liée à un changement de phase à même température (vaporisation, cristallisation, ...) et à la chaleur de réaction (quantité libérée ou absorbée par une réaction chimique ou biochimique). Voir le paragraphe 1.4.2./2 pour les échanges photoniques des systèmes.

2) Les dipôles électriques recouvrent une deuxième catégorie des forces de Van der Waals encore plus faible que la polarisation électronique mais jouant un grand rôle en écologie. Ils ne sont sensibles que lorsque les molécules ont des moments dipolaires très élevés (petites molécules à masse faible et polarité électronique relativement élevée, phénomène due au fait que les électrons orbient "plutôt d'un côté"), notamment les groupements FH, OH et NH. FH est rare mais OH est fréquent.

Il se forme alors des "liaisons hydrogènes" entre deux éléments H proches et notés H—H.

Ceci a une grande importance dans l'écosphère, car l'eau est fortement affectée par ce phénomène, $\text{H}-\text{O}-\text{H}-\text{H}-\text{O}-\text{H}$ de sorte que ce composé chimique qui "devrait être" un gaz (petite molécule) nécessite une énergie thermique beaucoup plus grande (chaleur latente) pour être vaporisé... et se solidifie dès 0°C . Ceci résulte de la structure polaire de l'eau à l'état liquide ; les molécules $\text{H}-\text{O}-\text{H}$ tendent à s'organiser dans l'espace pour former une structure en tétraèdre où un atome d'oxygène occupe le centre du tétraèdre dont les sommets sont des hydrogènes (Fig 1-5).

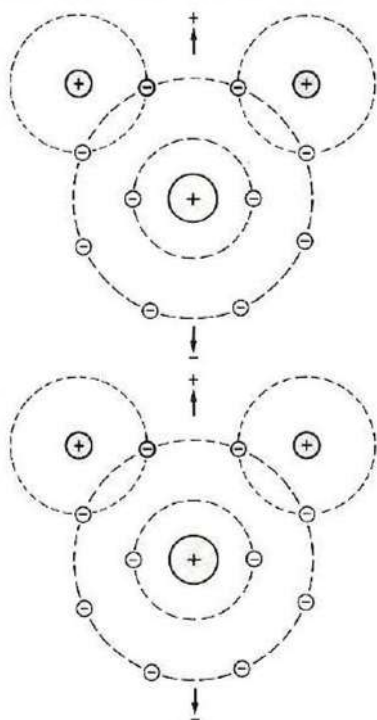


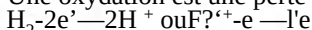
Figure 1-5 - Structure atomique de l'eau et dipole résultant de celle-ci

Dans les solutions aqueuses (p. 109, 121) des sols, de l'atmosphère (aérosols, p. 121) ou des organismes, les molécules sont 1) solutées dans le solvant eau ou 2) associées à des solides 2a) en suspension dans ce solvant ou 2b) constituant l'interface solide/liquide d'un système biphasique. Ces molécules, interagissent avec l'eau en modifiant, par leur(s) propre(s) polarité(s), la structure ordonnée de l'eau. Les parties polaires de ces molécules, ayant des affinités par liaison hydrogène, tendent à s'associer avec l'eau tandis que les parties non polaires se regrouperont entre elles, l'eau les "quittant" par manque d'affinité polaire. Ces parties polaires sont dites hydrophiles (= affinité avec l'eau), les parties non polaires lipophiles (n'ayant pas d'affinité avec l'eau comme les lipides) (on les dit aussi hydrophobes : non pas qu'elles fuient l'eau, mais que l'eau n'ayant aucune affinité, les quitte). Le mot "partie" est ici pris au sens de molécule (surtout petite et mobile) ou de grosses portions de molécules. Dans ce dernier cas, des molécules peuvent avoir des affinités hydrophiles pour une partie (ou des parties) et d'autres lipophiles (dans ce cas, la molécule est dit amphiphile).

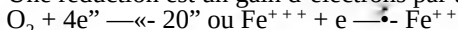
Ces forces polaires "les plus faibles" jouent un grand rôle dans l'organisation spatiale des molécules particulièrement en solutions hydriques puisqu'elles y orientent les macromolécules et "organisent" les structures mobiles. Or l'écosphère est très largement un vaste système triphasique gaz/liquide/solide où l'eau constitue le dénominateur commun des interfaces d'échange. Dans et à la périphérie de cette solution hydrique commune, les dipôles électriques orientent spatialement les molécules, ce qui structure (ordonne) l'espace au niveau moléculaire, macromoléculaire et souvent millimétrique (p. 68).

5. L'oxydoréduction

Une oxydation est une perte d'électrons, par un réducteur



Une réduction est un gain d'électrons par un oxydant



La forme oxydée et la forme réduite constituent un couple d'oxydoréduction ou couple redox. En effet globalement une espèce chimique ne peut s'oxyder (perdre e^-) que si une autre espèce, simultanément acquiert cet électron, c'est-à-dire est réduite. La première agit comme un réducteur de la seconde qui oxyde la première.

On mesure le potentiel d'oxydoréduction (en volts) à la différence de potentiel entre élément d'un couple redox cédant des électrons en notant, en valeur négative, le pouvoir réducteur (cédant) et positivement le pouvoir accepteur (oxydant). Cette mesure en volt est une expression des forces électromagnétiques plus ou moins grande selon la nature chimique du couple redox pris en considération. Lorsqu'il y a couplage, cette potentialité s'exprime en énergie/mole.

Il y a des chaînes successives d'oxydoréduction. Tour à tour, une molécule reçoit l'électron (cet oxydant se réduit) puis devient réducteur vis-à-vis d'une autre molécule, jouant le rôle d'oxydant (recevant l'électron) devant jouer à son tour le rôle de réducteur vis-à-vis d'un autre oxydant. Ces chaînes de réactions d'oxydoréduction fonctionnent avec "dégradation" de l'énergie, c'est-à-dire que les réactions chimiques sont globalement exergoniques (perte de l'énergie sous forme de chaleur : radiation à grande longueur d'onde). Il y a en fait "réalisation du potentiel énergétique" (exprimé en volts) par baisse, par étapes successives, de celui-ci dans un système qui peut être très complexe avec perte de chaleur (sous forme radiative) ou accumulation de celle-ci sous forme cinétique (élévation de la température).

Ces enchaînements réactionnels sont globalement organisés (p. 72, 119, 164) au niveau de l'écosphère à partir de l'énergie incidente solaire (source chaude) "changeant" le potentiel énergétique réactionnel puis, conformément au premier principe de la thermodynamique, par dégradation exergonique de l'énergie vers

l'espace (source froide) (p. 64), un cas particulier très important étant l'organisation des chaînes réactionnelles d'oxydoréduction d'êtres vivants (p. 77).

1.4.3. Les interactions gravitationnelles

La gravité ou pesanteur s'exprime, en physique newtonienne, comme une force résultant de l'attraction de deux objets l'un vis-à-vis de l'autre. Cette force est proportionnelle au produit de la masse de ces deux objets et inversement proportionnelle au carré de leur distance. La nature de cette force a été réinterprétée par la relativité restreinte puis générale, cette dernière l'associant aux propriétés fondamentales de la matière (courbure de l'espace-temps).

En écologie d'un point de vue opérationnel, l'approximation de la physique newtonienne est suffisante. Dans l'écosphère, une niasse de 1 kilogramme est soumise en général à une force de 9,81 Newton. Cette force gravifique diminue avec l'altitude et varie quelque peu horizontalement en raison des variations de densité des matières constitutives de l'écorce terrestre sous-jacent au lieu (variations mesurables par gravimétrie).

Les systèmes écologiques de l'écosphère sont tous soumis à cette force (attraction terrestre) et une énergie inverse permet des mouvements verticaux ascendants (énergie cinétique des gaz, dépenses énergétiques biologiques des plantes et animaux, des forces électromagnétiques importantes (capillarité, changement d'état, ...). L'étude des mouvements ascendants, contrebalançant les effets de la pesanteur dans les systèmes écologiques, est développée au paragraphe 2.3.

1.4.4. Les interactions faibles : la radioactivité

Les noyaux atomiques, composés de neutrons et de protons (p. 53) ne sont stables que sous la forme de 274 combinaisons nucléaires. Les autres noyaux sont instables et se désintègrent spontanément. Il s'agit d'une propriété intrinsèque d'instabilité qui transforme leur configuration nucléaire par émission de matière-énergie avec une certaine énergie cinétique associée à la matière éjectée.

On distingue (tableau 1-2, p. 53)

1) l'émission alpha", ou perte par un noyau instable trop lourd de simultanément 4 nucléons (dont 2 protons) sous forme d'un noyau d'hélium 4 (^4H) éjecté à grande vitesse hors de l'atome. Ce gros élément est très vite arrêté par les autres atomes (par une feuille de papier ou quelques centimètres dans un mélange gazeux comme l'air).

2) l'émission bêta', accompagne la transformation d'un neutron en proton par émission d'un électron (e^-) qui pénètre dans l'air sur plusieurs mètres ou dans quelques millimètres de tôle métallique.

3) l'émission bêta⁺, accompagne la transformation d'un proton en neutron avec émission d'un positon (e^+)-

4) l'émission alpha correspond à une intense évacuation d'énergie par un noyau ayant celle-ci en excès (on dit qu'il est excité). Cette radiation est très pénétrante (plusieurs centaines de mètres dans l'air, plusieurs centimètres dans le plomb). Il s'agit d'un rayonnement à très courte longueur d'onde (p. 56).

L'instabilité des noyaux conduisant aux radioactivités alpha", bêta⁺, bêta' et alpha⁺ est très variable. Certains noyaux à peine formés (par fusion de nucléons et autres particules) se désintègrent quasi immédiatement tandis que d'autres sont stables (donc non radioactifs). Entre ces deux extrêmes, tous les cas de figures existent et certains atomes ont une probabilité de se désintégrer, à chaque instant, plus ou moins forte. On exprime classiquement celle-ci par la "demi-vie" de l'isotope considéré, c'est-à-dire la durée au bout de laquelle la moitié des atomes de cet isotope sera désintégrée.

Etant une propriété intrinsèque aux "interactions nucléaires faibles" les forces gravitationnelles et électrostatiques beaucoup plus faibles sont strictement sans

influence sur cette probabilité de désintégration. En d'autres termes, la dilution spatiale, les liaisons moléculaires, l'état physique (gazeux, solide, ...), la disposition dans l'atmosphère (sol, grand fond marin, incorporation dans un organisme) n'ont aucune influence sur cette probabilité (demi-vie) de désintégration. A masse égale, un corps sera d'autant plus radioactif que sa demi-vie est brève (quelques fractions de secondes) et réciproquement, certains isotopes "presque" stables ont des demi-vies importantes (le ≈ 5700 ans).

A *contrario*, cette radio-activité relativement très énergétique bouscule puissamment les organisations régulées par les interactions gravitationnelles et électrostatiques.

Les conséquences de la radioactivité sont alors :

1) physiques : ce sont les effets de la radioactivité. L'énergie cinétique des émissions radioactives est ponctuellement considérable et perturbe les relations physiques, donc chimiques et biologiques, issues des interactions électrostatiques et gravitationnelles. Fondamentalement, ces sources d'énergies ionisent les atomes en arrachant les électrons à leurs réactions moléculaires et modifient donc les propriétés biophysicochimiques,

2) techniques : c'est l'usage des propriétés des radio-isotopes.

Toutes ces émissions ont donc une origine nucléaire (nucléus — ici noyau atomique). Les réactions nucléaires étant spontanées dans les astres, dont la terre et le soleil sont les deux principaux agents de la radioactivité terrestre naturelle à laquelle est soumise depuis toujours l'écosphère.

Avec le développement des applications de la physique nucléaire (militaire et civile), l'écosphère reçoit en plus des radiations très intensément localisées (explosion de bombes A ou H ou d'une centrale civile) ou diffuse (émission par perte de radionucléides, émission des déchets incluant des substances radioactives, ...) et accumule des atomes radio-actifs.

1.5. Vie et abios

1.5.1. Introduction

Bien des spéculations sur la nature de la vie ont été écrites, depuis sa création par Dieu (créationisme), en passant par l'évocation de forces vitales (vitalisme), jusqu'aux interprétations modernes où l'on a cherché à lui trouver des qualités particulières (pouvoir de reproduction, fabrication de cellules aptes à se diviser, mobilité, structures dissipatives, etc.). Si LAMARCK s'est débarrassé de celles-ci (citation p. 252), Ernst HAECKEL dut lui-même prendre systématiquement des positions anti-téléologiques (citation p. 23) qui aidèrent considérablement à décapiter ces magmas hypothétiques et qui aurait dû aider à l'épanouissement de la science - l'écologie ■ dont il vit la nécessité il y a plus de 120 ans.

Quelle différence y a-t-il entre abios et vie ?

Nous devons à Jacques TONNELAT (1978) une clarification nette des propriétés propres de la vie par opposition à l'"inerte", à l'"animé", que j'appellerai plutôt abios, car l'abios est animé et nullement inerte (vent, marées, lessivage, réactions chimiques, volcanisme, ...).

A part le créationisme, dont les fondements échappent à la démarche scientifique donc à l'écologie, les propriétés "spécifiques" de la vie évoquées antérieurement nous permettent souvent et sans doute la distinction des organismes de l'abios. Une observation attentive permet toutefois de trouver des exceptions criantes que nous n'évoquerons pas ici (cf. TONNELAT, op. cit.) et de comprendre que les "forces vitales" ne sont qu'un cas particulier et nullement spécifique des forces physiques classiques notamment celles des interactions électromagnétiques (p. 53).

La vie apparaît alors comme un état métastable (p. 67) d'organisation de réactions physicochimiques enchaînées qui assurent la métastabilité de cette organisation par une dépense d'énergie. Avec le temps (= évolution) ces états chimiques métastables ont engendré un système complexe où un code biochimique assure la reproduction des catalyseurs qui guident les réactions chimiques possibles et compatibles avec le système physicochimique où s'inscrivent ces systèmes d'état métastables.

Ces systèmes se sont rapidement délimités en "cellules" et constituent ainsi des sous-systèmes particuliers (vie), non isolés du système général car en échange permanent avec celui-ci, mais morphofonctionnellement organisé de façon particulière. Us sont distinctement délimités par rapport au reste du système écologique auquel ils appartiennent. L'état actuel, permettant une coupure non ambiguë au plan morphologique, ne doit en aucun cas faire oublier que cinétiquement ces systèmes biologiques sont ouverts et ne sont qu'une partie (qu'un sous-système) des systèmes écologiques comportant toujours par définition des fonctions abiotiques et vivantes. Un être vivant ne vit (= n'existe) que comme sous-système (fig. 1-6) d'un système écologique ; plusieurs individus appartiennent à une intrication vie-abios. Cette intrication est congénitale à la formation de nombreux sols (DARWIN, 1881).

L'assez grande confusion due à l'acceptation d'un certain nombre de dogmes, d'abord religieux puis d'origine "scientifique" oblige à une clarification sur les propriétés thermodynamiques d'équilibre métastable (p. 67), de complexité (p. 67) et d'interactions compétitionnelles (p. 69) en tant que propriétés écologiques (biophysicochimiques) avant de replacer la vie, comme organisation sophistiquée (p. 72), dans les systèmes écologiques (p. 88) où elle s'inscrit.

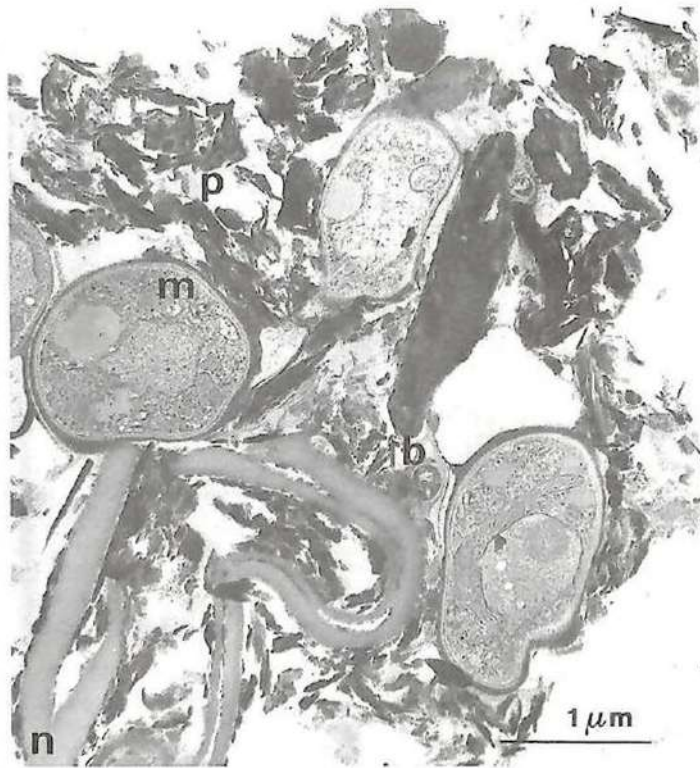


Figure 1-6 - Intrication de La vie et de l'abios. La nécromasse d'origine végétale (parois cellulosiques) in) est mêlée au sol minéral, dont les argiles sont identifiables par leur structure foliacée (élément phylliteux : p) ; la oie s'observe sous forme de bactéries (b) et mycélium <m> de champignons (d'après Vill emin et TOUTAIN, 1987)

1.5.2. Eléments de thermodynamique

Les systèmes, biologiques ou non, sont liés par les principes de la thermodynamique. Nous ne considérons en écologie que des systèmes ouverts, puisque l'écosphère est énergétiquement totalement ouverte.

(Jette écosphère est en effet une couche superficielle peu épaisse, incluant les êtres vivants qui, sur quelques mètres ou hectomètres d'épaisseur, recouvre d'un manteau discontinu le globe (p. 116). 11 y a incidence et pertes énergétiques (= échanges à partir de cette couche superficielle nullement fermée.

Les exposés de thermodynamique envisagent classiquement d'abord des systèmes isolés (sans échanges) puis des systèmes fermés (systèmes où il n'y a pas d'échanges de matière avec l'extérieur) où il a été possible d'expérimenter et d'établir les principes fondamentaux permettant de prendre en considération ultérieurement les systèmes ouverts.

Le premier principe de la thermodynamique pose que, si l'on considère un système fermé, le travail nécessaire pour changer "d'état" (deux états énergétiques)

ne dépend ni de la source de travail ni de la somme de ce travail. Il affirme la conservation de l'énergie à l'intérieur d'un système fermé. Ce point de vue initial, basé sur le "travail" des machines a dû être complété en admettant l'équivalence chaleur = travail = énergie ou plus exactement U (énergie) = W (travail) + Q (chaleur).

Le deuxième principe découle des rapports inégaux entre W et Q , que nous reverrons plus bas, mais qui succinctement montre que dans un système avec U constante où $U = W + Q$ si $W \rightarrow Q$, Q en retour ne donne pas W en totalité ; la réaction $W \rightarrow Q$ est totalement possible, pas l'inverse. On peut dire que le système avec le temps évolue vers son "entropie" maximale (voir ci-dessous).

Dans la pratique des systèmes ouverts, la chaleur se dissipe d'ailleurs sous forme d'infrarouge : les systèmes fonctionnels sont exergoniques et le travail (de déplacement, ...) finit globalement par une dégradation de l'énergie sous forme de chaleur (= exergonie). Les systèmes fonctionnent en cédant de l'énergie à une "source froide" (usuellement schématisée par un condensateur).

L'entropie S est une variable d'état d'un système quelconque (donc de tout système écologique). Cette variable d'état est liée seulement à la température absolue T (elle traduit "l'aptitude thermique") et reflète en quelque sorte la "capacité" du système décrit. L'énergie étant $U = F + TS$ dans un système échangeant avec l'extérieur (travail, chaleur) où F est l'énergie libre (= échangeable) et TS l'énergie liée au système par un effet purement thermique. Pour tenir compte de variations du volume (V) et de pression (P) (p. 59), GLBBS a proposé la notion d'enthalpie libre où $G = U + PV - TS$ ou $G = F + PV$. L'enthalpie est liée à la thermodynamique des échanges des réactions (chimiques) avec l'extérieur (énergie libre + changement d'état PV).

L'entropie S est donc une propriété d'état des systèmes (ou matériaux) donc des écosystèmes. Elle est additive (l'entropie S est égale à la somme de ses parties $S_1, S_2, \dots S_n$). L'état TS peut changer de deux manières

- a) par échange de chaleur avec l'extérieur, jouant sur T = la température, (p. 113),
- b) par changement d'état S interne. Le concept de chaleur d'un système fermé est évidemment étroitement lié à TS et ses échanges de F .

La chaleur est une agitation thermique (nulle à $0^\circ K$, p. 58) mais cette agitation a pour conséquence une dispersion, un mélange des éléments (non fortement liés). C'est typiquement le cas des gaz parfaits, qui se mélangent "parfaitement" en se dispersant mutuellement par simple agitation thermique : à l'ordre initial s'est substitué un désordre indescriptible (si ce n'est statistiquement). Cette idée a conduit à identifier l'ordre (à le définir en quelque sorte) par l'inverse de l'entropie : la négentropie. Mais il ne s'agit, comme nous allons le voir, que d'une idée reçue, que d'un dogme accepté.

En critiquant les raisonnements classiques de la thermodynamique, TONNELAT (1977) a montré que, contrairement à ce dogme, une augmentation d'entropie n'implique pas nécessairement une augmentation du désordre par la relation classique $dQ = TdS$ (dQ = échange infiniment petit de chaleur avec un système extérieur restreint, assez petit pour que les variations soient négligeables ; T = température absolue du système et S = entropie). Pour les auteurs classiques, S est fonction à la fois de la répartition entre formes et niveaux d'énergie et entre répartition dans l'espace. TONNELAT (1978) s'est assuré qu'en aucun cas : <<les répartitions dans l'espace ne sont prises en considération : en thermodynamique classique on ne considère que des échanges d'énergies et en thermodynamique statistique, que des variations dans la répartition entre niveaux d'énergie>> (TONNELAT, 1978).

Nous reprendrons de façon très résumée les conclusions de TONNELAT, déjà résumées dans son ouvrage (1978), auquel il faut se reporter pour un exposé complet.

En l'ail, on démontre que la variable d'échange énergétique en cause porte sur la variation de complexité énergétique : $dQ = kT dC_e$, où k — constante de Boltzmann ayant la dimension d'une énergie ($k = 1,38.10^{23}$ joules), C_e = complexité énergétique (variation des possibilités de répartition des états d'énergie à leur équilibre), dQ = échange de chaleur du système.

En considérant que l'échange de chaleur d'un système ne se fait pas de façon conservatrice (système à température ou travail donc pression variable), et que ce système forme avec un entour extérieur restreint un ensemble isolé (isolé = pas d'échange de matière-énergie), le "niveau d'échange" ainsi constitué subit une augmentation de complexité.

Cette variations effective de complexité est composée de deux parties :

$dC = dC_c + dC_g$ où $dC_c = dQ/kT$ et où dC_g est l'augmentation de complexité non directement liée à l'échange de chaleur ; dC_g est due soit à un accroissement de complexité spatiale soit à une augmentation de la complexité énergétique. Pratiquement, dans une transformation non conservative, une augmentation globale énergétique est presque toujours liée à une augmentation de complexité énergétique, ce qui entraîne $dQ < kT dC_e$ qui peut s'écrire par l'inéquation $dQ < TdS$. Une augmentation gratuite de la complexité énergétique entraîne une augmentation de l'entropie qui n'est pas compensée par un échange de chaleur conservatif (dC_g "assure" la différence !).

La variation spontanée du système peut ne porter que sur la répartition dans l'espace, mais on ne peut généralement déterminer que les variations de complexité énergétique (la complexité spatiale étant presque toujours faible). Les variations de complexité d'énergie sont appelées "énergie" libre F

$$F = E - kTC_e = E - TS ; (E = \text{énergie interne du système})$$

On démontre que à température constante :

$$DC_{eg} = \frac{-(DF - DW)}{kT}$$

DW = travail échangé en même temps que la chaleur

Presque toujours en écologie, les réactions étant à pression quasi constante, il y a un travail effectué pour ou contre la pression et il est plus commode de remplacer F par G décrit ci-dessus.

$$DG = DH - kT DC_e = DH - TDS \text{ avec } DH = DE + DPV$$

La condition pour qu'une réaction (non accompagnée d'un autre travail) se fasse spontanément s'écrit : $DG < 0$. On dit qu'elle est exergonique.

C'est le deuxième principe de la thermodynamique : s'il est facile de transformer du travail en chaleur, l'inverse est plus difficile et n'est jamais totalement atteint (il y a "perte" de chaleur) - il y a donc "irréversibilité" entre travail et chaleur toutes deux, formes d'énergie (cf. 1er principe).

Dans le métabolisme des êtres vivants on observe souvent que des réactions chimiques se font *a contrario* tel que $DG > 0$, c'est-à-dire que les produits finaux ont une probabilité d'existence inférieure aux produits initiaux (dans ce cas, la réaction est dite endergonique). Dans tous ces cas, on prouve que cette réaction est couplée à une réaction simultanée dont la variation d'enthalpie libre est fort négative par rapport au gain positif d'enthalpie libre de la première (p. 57) : c'est le couple réactionnel qui a bien une enthalpie libre globalement négative.

De tels couplages impliquent une organisation spatiale très précise. En fait, cette organisation peut être extrêmement complexe mais dans tous les cas, les échanges doivent être globalement exergoniques et peuvent localement être endergoniques. Au plan fondamental, l'étude des couplages s'applique à toutes les

échelles établies et à tous les niveaux énergétiques. Souvent, en écologie analytique, nous nous plaçons dans une situation particulière entre ces niveaux ; souvent nous ne considérons qu'un sous-système hors son système ce qui n'est qu'un artefact dû aux options réductionnistes effectuées pour l'analyse. L'important est de le savoir.

1.5.3. Etats métastables

Les transformations doivent respecter une variation négative d'enthalpie libre ($DG < 0$). Mais si globalement (avec ou non réaction chimique couplée), cette condition est nécessaire, elle n'est en aucun cas suffisante, pour déclencher la "réaction", la modification. Il suffit que ce changement d'état (d'un état initial vers un état plus probable, c'est-à-dire avec $DG < 0$) passe par un état intermédiaire de probabilité plus faible pour que sa probabilité finale devienne celle de cet intermédiaire. Cette probabilité intermédiaire peut être très faible (= quasi nulle) ; c'est dire, en pratique, qu'il y a stabilité. On dit qu'il y a état métastable quand celui-ci, pris globalement, est non pas le plus stable possible en terme de probabilité, mais le plus stable en raison de son organisation parmi les changements d'état possibles ; une "barrière" constituée par un passage temporaire obligatoire via un état improbable, empêche le passage à l'état le plus probable.

Le passage à un état stable plus probable pourra alors se faire par une "activation énergétique locale" entraînant la levée de cet état "intermédiaire" moins probable, soit à l'échelle microscopique, par l'intervention transitoire d'un catalyseur, soit par l'apport d'une "énergie d'activation" dans le système pouvant avoir des conséquences macroscopiques catastrophiques (énergie cinétique d'une érosion de soi, feu, broyage des aliments chez un phagotrophe, ...). Le système préalablement stable est "déstabilisé". De ce point de vue, en écologie, tout est métastable, d'où la fragilité de certains systèmes, car les systèmes observés par l'écologue sont toujours ouverts.

L'équilibre métastable joue un rôle très important car l'organisation fonctionnelle de nombreux systèmes est précisément possible dans les limites étroites d'une activation compatible avec cette organisation. Elle est notamment détruite par des apports énergétiques incompatibles (ionisation, feu, ...) mais hors ceux-ci, et dans des marges étroites, elle canalise les enchaînements réactionnels, biotiques et abiotiques tant qu'une agitation brownienne (thermique) excessive, les ionisations ou des contraintes mécaniques ne la désorganisent pas.

Notons, pour finir, que la notion de stabilité est relative à une échelle de temps et que finalement tout est métastable. Les éléments temporospatialement les plus stables sont aussi souvent quantitativement les plus importants (paradoxe systémique, p. 45) et conditionnent souvent, comme "constantes", les modalités fonctionnelles des autres composants du système.

1.5.4. Information, désordre et complexité biophysicochimique

C'est à TONNELAT (1978) que j'emprunte encore l'essentiel des idées, voire des lignes du présent paragraphe, car un certain nombre de tentatives ont été entreprises en écologie pour tendre à conforter cette discipline par la thermodynamique et par la théorie de l'information, apparemment liée à celle-ci, ce qui s'avère aujourd'hui fallacieux.

En cela, les écologues ont "fait confiance" (et pourquoi ne l'aurait-il pas fait ?) aux "acquis" de thermodynamiciens qui, tel BIULLOIN (1951, 1956), ont eu une forte influence. Cet auteur admet (et "démontre" par une analogie de formulation mathématique) l'identité entre entropies S (p. 65) négative, ou "négentropie" et l'information utile, au sens défini au paragraphe 1.7.1. et initialement développée par SHANNON et WEAVER (1949). Il s'avère malheureusement que ce lien entre négentropie et ordre relevait, depuis BOLTZMANN (1898), plus du dogme accepté que de la démonstration rigoureuse. TONNELAT (op. cit.) précisément invalide ce dogme et souligne qu'en tout cas pour un système $< <\text{une acquisition d'information n'a aucune influence sur son entropie}> >$.

En tout état de cause, l'écologue en ce domaine se heurte à des difficultés très nombreuses que nous allons partiellement énumérées ci-dessous.

Dans les systèmes ouverts, portions du champ écologique dont les êtres vivants, il y a entrée (ou sortie) de substances du système. <<Pratiquement, l'incorporation ou l'expulsion de matière par un système ne se fait jamais de façon conservative. En théorie, la connaissance de tous les états d'énergie et de toutes les positions permettrait de calculer la complexité du système initial, de la substance libre et du système après son absorption. Pratiquement, ce calcul n'est jamais abordable >> (TONNELAT, 1978).

La complexité spatiale d'un système ne concerne que les possibilités de répartition dans l'espace. La complexité globale d'un système est la somme de sa complexité spatiale et de sa complexité énergétique (répartition des molécules dans l'espace d'une part et d'autre part répartition des niveaux ou formes d'énergies). < < Il peut n'exister aucun lien entre une augmentation du nombre de répartitions possibles entre niveaux d'énergie à l'équilibre, donc une augmentation d'entropie, et le nombre de dispositions dans l'espace.

Nous arrivons ainsi à une conclusion qui n'est pas compatible avec la croyance générale que l'augmentation d'entropie d'un système entraîne nécessairement une augmentation du nombre de dispositions possibles de ces constituants dans l'espace>>. (TONNELAT, 1978).

Quant au désordre, nous n'avons aucun moyens de le mesurer et l'idée que toute augmentation d'entropie entraîne un désordre, fort ancienne et très généralement admise, que TONNELAT relève semble-t-il dès CLAUSIUS (1865), n'a pas de fondement scientifique.

De même, il y a absence de lien entre entropie et information contrairement au fait qu'< <une assimilation très précise a été faite par L. Brillouin (1951, 1956) entre information et entropie ayant changé de signe ou "négentropie"> > (TONNELAT, 1977). Cette assimilation s'appuyant sur l'analogie apparente entre certaine formulation de l'entropie $S = - kS \sum P_j \ln P_j$ (où les P_j sont les probabilités d'information de SHANNON et WEAVER (1949) (p. 89). Mais analogie ne signifie pas homologie ; il ne s'agit que de deux modes d'expression de probabilité, pondérés de la même manière, mais portant sur des entités n'ayant aucun rapport entre elles. Elle sera pourtant réitérée de CLAUSIUS à PRIGOGYNE <<...un système isolé évolue spontanément vers un état d'équilibre qui correspond à l'entropie maximale, c'est-à-dire au plus grand désordre>> (PRIGOGYNE, 1972).

<<Bien que l'état d'équilibre soit celui qui peut être obtenu du plus grand nombre de façons, il n'est certainement pas le plus désordonné possible, contrairement à ce qu'on dit habituellement. En effet, c'est certainement un état singulier puisque dans cet état, les effets de forces qui s'exercent sur lui de l'extérieur ou dans son sein se compensent. C'est un état dans lequel la disposition des constituants satisfait à certaines règles qui n'ont pas leur équivalent pour la plupart des autres états de probabilité notable, c'est donc un état plus ordonné>>. (TONNELAT, 1978).

DANCHIN (1978b) montre que l'idée d'un mélange thermodynamique de deux gaz parfaits inspire et motive les analyses de BOLTZMANN et que dans ce cas on se fait l'idée d'un grand désordre spatial qui résulte des agitations-dispersions des deux gaz mutuels du fait de la chaleur. Dans un tel système il n'y a pas d'information et toute structuration serait une information, d'où l'idée purement intuitive et fautive d'une analogie entre négentropie et "ordre" ou "information". Nous reverrons plus précisément le caractère opérationnel de l'ordre et de l'information respectivement aux paragraphes 1.6.1. et 1.7., mais nous soulignerons avec DANCHIN <<le gaz parfait est pourtant un piètre modèle du monde qui nous entoure>> cet auteur insistant d'ailleurs sur l'importance des forces de Van der Waals dans l'eau (p. 59), notamment pour les structures biologiques < <Un enchaînement d'acides aminés, par exemple, peut prendre dans l'espace, un grand nombre de formes. Toutes représentent un certain ordre et c'est en fait un concept opératoire (intuitivement étranger à la

thermodynamique) qui va définir le "bon" ordre (avec toutes les connotations culturelles sous-tendant le couple bon-mauvais). Le "bon ordre" est celui qui permet d'opérer une certaine fonction, par exemple, dans le cas des protéines, la catalyse. Dans l'eau, la forme correspondante est prise par la protéine grâce à l'augmentation d'entropie qui conduit à rassembler les résidus hydrophobes vers l'intérieur en laissant les résidus hydrophiles à l'extérieur. De même, la double hélice de DNA se constitue spontanément dans l'eau et toutes les macromolécules biologiques se façonnent selon un certain ordre que l'on reconnaît *a posteriori* comme pertinent mais qui l'est bien souvent de façon contingente.

Non seulement le deuxième principe n'est pas contradictoire avec la vie mais il en est même l'acteur principal (DANCHIN, 1978a), depuis l'origine de la vie jusqu'à sa forme actuelle. Bien sûr, l'édification des macromolécules à partir de petites molécules nécessite des réactions chimiques consommant de l'énergie et l'envahissement du vivant sur La terre n'a pu se produire que grâce à un constant apport d'énergie extérieur ; mais la mise en ordre du système utilise au mieux à chacune de ses étapes (génèse des membranes, mise en forme des acides nucléiques, des protéines, des organites cellulaires) le flux d'entropie > > (DANCHIN, 1978b).

Réduire les interactions aux seules liaisons chimiques et effet de la chaleur, dans les structures écologiques, et particulièrement les sous-systèmes biologiques, est donc un artefact réductionniste qui, des gaz parfaits (BOLTZMANN, 1898), a conduit à des interprétations bien limitées de la thermodynamique des systèmes biologiques centrées sur la thermodynamique du non équilibre engendrant des <<structures dissipatives> > (PK1GOGYNE, 1972).

Bien au contraire, c'est < la tendance à évoluer vers un état d'équilibre avec augmentation de l'entropie qui est peut-être la source des systèmes vivants >> (DANCHIN, 1978b). Ce ne serait plus la négentropie mais l'entropie qui induirait les organisations dès que l'on sort du système liaisons chimiques/chaleur. Nous verrons au niveau des systèmes écologiques l'importance et la généralisation de ce constat (p. 72).

1.5.5. La compétition

Il y a lieu de tirer les conséquences des propriétés générales des phénomènes physiques qui jouent dans l'écosphère. Avant même que l'objet de l'écologie n'existe (relation des organismes avec leur milieu, c'est-à-dire avant l'existence de ces organismes, p. 74), avant même que la dichotomie des réactions chimiques ne se fasse entre réactions chimiques et réactions biochimiques auto-contrôlées, c'est-à-dire avant même la différenciation de la vie la compétition existait.

1) La vitesse de réaction est proportionnelle à la probabilité de rencontre simultanée des deux types de molécules réagissantes, à une température donnée, et est donc proportionnelle au nombre de molécules de chacun de ces types (règle de Van't Hoff).

2) Une réaction chimique est fonction de la température. La température n'est qu'une mesure de l'agitation atomique et moléculaire, un reflet de la probabilité que deux entités chimiques (donc biochimiques) se rencontrent pour une réaction donnée.

La loi classique reliant une réaction chimique à la température est une relation exponentielle du type : $y = e^{1/23}$. La formule d'ARRHENIUS donne à la constante de vitesse d'une réaction chimique la valeur $k_p = A e^{E/KRT}$ où E est l'énergie d'activation de la réaction, R la constante des gaz parfaits, T la température absolue, et A la constante absolue de la réaction.

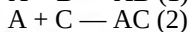
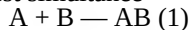
3) Ces lois chimiques ne sont applicables que dans la mesure où les distances interatomiques/intermoléculaires ne sont pas radicalement modifiées par un changement d'état (état cristallin, état liquide, état gazeux, désorganisation du système écologique ou biologique, ...). Les changements d'état dépendent de la pression qui est usuellement négligée car quasi constante dans l'écosphère (mais pas toujours : vie abyssale des sources chaudes, p. 75).

4) L'organisation des réactions chimiques complexes, avec des éléments ou molécules arrivant dans le système, ne peut se maintenir que si ces éléments sont dans des états compatibles avec leur présence dans le milieu réactif.

5) Une réaction spontanée, sans fourniture d'énergie externe, ne fonctionne que si elle est exergonique par dégradation de l'énergie ce qui la rend, dans ce cas, irréversible : $2\text{HCl} + \text{Zn} \longrightarrow \text{H}_2 + \text{ZnCl}_2 + \text{U}$

6) Si deux réactions non réversibles, et dont les produits finaux sont stables (p. 67), utilisent un même substrat en quantité limitée, il y a concurrence ou compétition pour l'usage de ce substrat.

6a) La compétition est simultanée



A l'épuisement de A, le rapport AB/AC nous renseigne sur l'efficacité relative des réactions (1) et (2) pour utiliser le substrat A ou l'affinité de B et C pour A. Il y a compétition en parallèle (où cette "efficacité" dépend des concentrations de B et C) ;

6b) La compétition est séquentielle si B est présent avant C



Le rapport AB/AC nous renseigne sur l'importance de B (qui peut être ainsi substrat limitant) évitant l'épuisement de A et si C est mis en oeuvre après l'arrêt de la réaction (1) formant AB. Il y a compétition en série.

Il peut y avoir chevauchement des mécanismes séquentiels et simultanées si C est mis en jeu avant l'épuisement de B. C'est-à-dire intrication partielle des compétitions en parallèle et en série.

En fait, la réaction simultanée dépend de la concentration de A et B : (A) + (B) (AB), c'est-à-dire de la probabilité de rencontre de A avec B et de la mesure (poules gaz) "rapprochant" A de B et de la température "agitant" A et B (c'est-à-dire augmentant les fréquences de rencontre). Enfin les affinités chimiques (p. 564) joueront un rôle essentiel dans cet équilibre de compétition.

Ces propriétés fondamentales prendront des aspects parfois fort sophistiqués dans les ensembles biologiques complexes mais restent globalement toujours vrais. Le jargon naturaliste ne fait que constater avec des variantes diverses le respect de ces lois par les systèmes vivants.

11 faut toutefois remarquer que cette propriété fondamentale, ce véritable truisme conséquence immédiate de toutes compétitions en parallèle, (au moins un couple de compétiteurs, mais usuellement de beaucoup plus), est l'objet d'un commentaire abondant. Cette abondance reflète très logiquement celle des événements en cause, mais aussi souvent des concepts confus (en raison du manque de conceptualisation, à partir de ce processus fondamental intervenant dès qu'il y a cinèse de A vers B sous les aspects multiformes de la compétition).

Le mot compétition implique

1) qu'il y ait une ressource limitée (dans notre exemple A) par rapport à deux (ou n) "réacteurs" rentrant en combinaison avec cet élément limité. Si A est beaucoup plus grand que B + C, il n'y a pas compétition : les "réactions" AB et AC s'accomplissent totalement,

2) que les compétiteurs (entrant en réaction avec A) soit spatialement co-présents, mais non temporellement, dans le 2ème cas C intervient après B et son aptitude dépend de la quantité A et B. Si B < A, AC est possible sinon la réaction AC est impossible faute de A, lorsque B intervient,

3) que la réaction en parallèle (simultanément) dépend des fréquences (occurrences) relatives de B et C vis-à-vis de A soit une cohérence spatiale, accrue avec la mobilité d'un élément par rapport à l'autre (agitation atomique, moléculaire, cellulaire, individuelle, courant, mouvement aérien,...)

4) que l'affinité de B ou C (la probabilité dans la réaction de liaison individuelle de former AB et AC) soit plus ou moins grande mais existe (ici que les réactions ne soient pas $\text{A} + \text{B} \longrightarrow \text{AB}$ et $\text{D} + \text{C} \longrightarrow \text{DC}$), il doit y avoir une certaine identité fonctionnelle entre compétiteurs (ici B et C).

Ces conditions ne sont quantitativement appréciées dans le champ écologique que de façon exceptionnelle. Elles coïncident en grande partie avec les trois référendaires (espace, temps, composition) mais y ajoute une mesure : celle de l'affinité A-C ou A-B, la composition incluant les qualités A, B, C... et leurs quantités [A], [B], [C], ...

A ce constat fondamental relatif à la compétition s'oppose l'usage multiforme du mot issu des diverses perceptions restreintes du mot compétition. Un système écologique (vivant ou non) implique pour son maintien une entrée énergétique (p. 64) se combinant à celui-ci pour former matière et énergie ; ce système (comme B) peut être considéré comme compétiteur d'un autre système (comme C) utilisant cette même entrée (A) si celle-ci est spatiotemporellement limitée.

De là à considérer que la disposition de tout élément écologique (système écologique) résulte de son élimination par un ou n "compétiteurs" plus "performants", il n'y a qu'un pas.

Ce pas est intuitivement franchi pour tout observateur de la disparition d'un "élément" écologique, dont, non moins intuitivement, on peut supposer la cause. Ainsi tout jardinier expliquera que telle plante cultivée est "étouffée" par des mauvaises herbes. C'est-à-dire résiste mal à la compétition de ces dernières... cette compétition se faisant pour plusieurs composants supposés limitants : la lumière pour la fonction chlorophyllienne, l'eau pour le fonctionnement des transferts hydrodynamiques, les éléments chimiques biogènes, ... Ce jugement empirique global de compétition est très fréquent ; il est utilisé pour "expliquer" toute sorte de phénomènes d'élimination (réduction, disparition) de sous-systèmes dans les systèmes écologiques, voire, au contraire, d'hypertrophie. Mais en dehors du fait objectif (du constat opérationnel) de la disparition de ces sous-systèmes (ou du caractère chétif prédestinant la culture "étouffée" du jardinier à un bien piètre avenir), les causes évoquées sont généralement des hypothèses et rarement des interprétations prouvées sans alternative (p. 180, 237) car la démonstration implique que, parmi toute les causes possibles, celles actives (limitantes et "partagées") soient prouvées.

Comme décrit aux points 1, 2, 3 et 4 ci-dessus, la compétition est consubstantielle au fonctionnement. Elle est donc une réalité omniprésente de tout système écologique et n'a pas, en tant que telle, à être démontrée. D'autre part, l'élimination de sous-systèmes dans un système est synchroniquement ou diachroniquement observable par étude comparative. Par contre, la démonstration des mécanismes expliquant des disparitions particulières impliquent une connaissance systématique de la variation du système conduisant au constat en cause.

Une assez grande confusion s'est établie dans l'esprit des biologistes pour désigner par compétition un ensemble flou et indéterminé d'événements qui favorisent ou défavorisent les êtres vivants dans leur lutte pour la vie (MILNE, 1961). En raison de cette extension littéraire du discours sur la Nature, le mot compétition devient alors peu opérationnel, ou si l'on préfère si flexible qu'il ne prouve plus rien (réfutabilité, p. 25). En anglais, (mais c'est la même chose en français), Harper (1961) propose son abandon, alors que GRIME (1979) lui attribue une position centrale pour reconnaître une modalité d'adaptation (= strategy) sous le nom de "compétiteurs" (p. 244). Dans ce cas, cet auteur définit la compétition (biologique et plus restrictivement végétale) comme < <the tendency of neighbouring plants to utilize the same quantum of light, ion of mineral nutrient, molecule of water, or volume of space>>. Opérationnellement, la "tendance" n'existe pas et l'on ne peut que constater l'effet. Dans l'exemple le quantum, l'ion, la molécule d'eau ou le volume d'espace est assimilé (utilisé) par C et non B (ou l'inverse). On constate l'effet de C sur B (ou l'inverse) vis-à-vis d'une ressource limitée.

On peut remarquer que la compétition n'implique pas l'élimination de C par B (ou l'inverse) mais peut temporospatialement aboutir à un équilibre C et B se partageant plus ou moins équitablement (= également en fonction des besoins spécifiques de B ou C) la ressource limitante. On parle alors d'équilibre (ce qui implique que les cohabitants soient effectivement en compétition !).

1.6.. Organisation et organisation

1.6.1. Les systèmes écologiques : leur organisation vers la complexité

< <Un système est un ensemble d'éléments dépendant les uns des autres et formant un tout organisé, AE, 1972>> (exemple ; système nerveux, système solaire, système métrique). En définissant l'écologie E. HAECKEL a décrit opérationnellement l'étude de systèmes : l'< <étude globale des relations des organismes avec leur monde extérieur environnant> > implique nécessairement une notion de système. Il s'agit de système(s) comprenant les diverses propriétés des organismes, la variété de leurs milieux et la structure des relations d'échange de ces composants.

Les divers états interfèrent et se modifient par des échanges (cinèses, p. 43) liés aux propriétés fondamentales de la matière-énergie, c'est-à-dire aux interactions physiques dans celle-ci.

La relation mutuelle des états "formant un tout organisé" en systèmes écologiques est donc cinétique par ses effets et énergétique au plan matière-énergie.

Organiser signifie simultanément : 1) arranger un ensemble d'après un ordre (ex : organiser son bureau), 2) constituer un tout unifié ayant des parties avec relations cohérentes (ex : faire un montage d'appareils), 3) arranger les éléments pour un objectif (ex : planifier une expérience). Ce sont simultanément les deux premiers sens (ordre et tout avec relations cohérentes) qui désigne ici "organiser". Le dernier sens, qui implique une finalité, au sens finalisme, est incompatible avec la démarche scientifique *stricto sensu* : elle est source fréquente de confusion intellectuelle (cf. p. 248 : stratégies). L'organisation des systèmes écologiques a les deux premiers sens simultanément : un arrangement suivant un certain "ordre" d'éléments d'un système en un tout cohérent.

Nous reverrons plus en détail cette organisation des systèmes au paragraphe 1.7. mais la notion d'ordre sous-jacente, ou associée au concept d'organisation doit ici être précisée, car ce mot peut être considéré comme signifiant l'ordre des éléments naturels observés (la structure même de la nature) et, par ailleurs, comme l'ordre issu d'un travail intellectuel de synthèse (résultant de l'étude de la globalyse).

D'un point de vue opérationnel, en écologie, la position du scientifique n'oppose pas ces deux derniers concepts mais confronte en permanence ceux-ci notamment par la modélisation (p. 390). La perception de l'ordre même de la Nature par l'écologue est toujours restreinte et est confrontée à l'idée provisoire qu'il s'en fait. L'ordre perçu, scientifiquement très imparfait et constamment réorganisé à partir des faits, est fourni par le champ écologique (p. 35). La complexité des systèmes écologiques réels d'une part, et des démarches d'intégration d'autre part, obligent à une élaboration conceptuelle, méthodique et opérationnelle spécifique qui sera présentée au paragraphe 1.7.6. puis finalement résumée au chapitre Vil.

En restant ici au niveau très général où nous nous plaçons, il y a lieu toutefois de tirer les conséquences des propriétés de la matière-énergie évoquée d'un point de vue physique (p. 52) et du point de vue de la thermodynamique des systèmes (p. 63).

Au niveau de l'écosphère, une organisation, un ordre existe à partir des interactions électromagnétiques (interactions chimiques, interactions de Van der Waals) et des interactions gravitationnelles.

Par exemple, les apports énergétiques solaires entraînent un changement de phase (vaporisation de l'eau : interaction au niveau polarisation électrique). Cette énergie de vaporisation travaille "contre" la pesanteur. Après perte de chaleur, cette eau est condensée puis entraînée par gravité (précipitations). Ce grand mouvement hydrique constitue un ordre important qui peut être très organisé à l'échelle millimétrique lorsque les flux hydriques circulent dans des systèmes solides/hydriques, notamment dans les sols.

De même, les interactions chimiques, intervenant également dans et au contact des solutions hydriques, sont ordonnées en chaînes dégradatrices exergoniques susceptibles d'une organisation parfois spécifique (nucléation des structures dissipatives de PRIGOGINE, 1972). Elles conduisent à des molécules susceptibles de s'entre-organiser par leurs polarités en structures fonctionnelles, tels la structure tertiaire des protéines, les chélates des humus, les pellicules hydrophobes de la surface des mers, les interactions hydrophobes/hydrophiles des nucléotides/acides aminés ... (les diverses structures étant activées par des sources énergétiques exogènes (soleil) ou endogènes (géothermie) créent des organisations systémiques à toute échelle, de l'écosphère à l'interface eau-argile ou enzyme-substrat. Les structures les plus sophistiquées peuvent faire intervenir des propriétés d'organisation polaires très peu énergétiques, mais toujours les changements d'état s'accompagnent de Cinèses assurant la connexité systémique (p. 93).

Dans les systèmes ouverts, régulièrement alimentés en éléments susceptibles de réactions en chaîne, c'est-à-dire traversés par une Cinèse (débit) de matière avec une dégradation régulière d'énergie (réactions exothermiques en chaîne), il y a nécessairement une séquence temporelle, "une organisation spatiotemporelle".

Cette organisation, schématisée fig. 1-7, canalise les fonctions et conduit à la synthèse de BD au temps t_1 avant sa réaction avec E et de DE (temps t_2) avant sa réaction avec F (organisation temporelle en chaîne). De telles réactions impliquent un déplacement (tel AB vers CD) dans l'espace. Elles peuvent donc être organisées spatialement, par exemple si les "réactifs" AB, CD puis E, puis F arrivent dans une structure spatiale par un débit (écoulement) ou/et ne peuvent réagir pour des raisons d'affinités chimiques que dans l'ordre décrit.

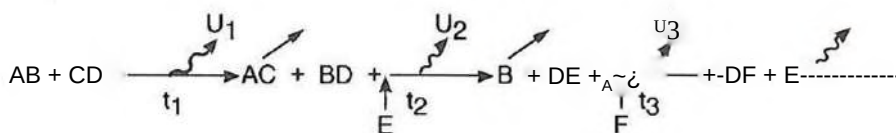


Figure 1-7 - Enchaînements réactionnels impliquant une organisation spatiotemporelle séquentielle

Cet ordre réactionnel, et sa distribution spatiotemporelle concomitante, ne sont pas nécessairement uniquement "littéraires", plusieurs réactions pouvant conduire à une même substance reprise ensuite dans une voie et réciproquement une même substance pouvant dévier vers deux voies en compétition ; s'il y a bien chaînon réactionnel, ceux-ci s'organisent en réseaux spatiotemporels.

Dans un système planétaire purement physico-chimique, de très nombreux mouvements apportent de tels débits spatiotemporels et peuvent avoir une assez grande régularité dans le temps (courants hydriques marins ou terrestres, émanations volcaniques sous marines), des courants fluides à convexité peuvent conduire à un certain recyclage des éléments. Une organisation spatiotemporelle facilement observable existe macroscopiquement ; elle est distribuée à toute échelle. Ce recyclage d'éléments peut avoir une certaine importance lorsque la réaction chimique en cause implique l'intervention dans les conditions du milieu de catalyseurs (p. 67). C'est-à-dire d'éléments intervenant dans une réaction chimique, sans être liés aux produits finaux, mais permettant une réaction chimique - sinon très improbable - dans les conditions de ce système. C'est le passage d'un état chimique métastable à un autre état métastable plus probable grâce à un catalyseur. De tels catalyseurs existent dans la nature minérale, telles les argiles (LASZLO, 1984), et possèdent en outre la

propriété de permettre des adsorptions de surface spatialement organisées et un transport fluidisant périphérique. Les réactions chimiques s'enchaînent. La structure physicochimique de la surface de la terre possède une organisation au moins temporaire. Le temps, étant pris ici à l'échelle du milliard d'années, est énorme pour un évènement local en terme de cinèses, de température et pression.

1.6.2. Emergence de la vie

A quel moment dans les systèmes réactionnels naturels la vie s'est-elle différenciée ? Sous quelle forme ? Nul ne sait précisément. Reconnaissons que cette vaste question n'est abordée présentement que par des études qui manquent de la globalité propre à l'écologie et à partir d'observations et de reconstitutions historiques peu réfutables, tant les arguments sont indirects et partiels.

Les études de biochimie, tendant à reconstituer les molécules élémentaires constitutives de la vie, essaient de définir les conditions initiales pour une première organisation vitale : une atmosphère réductrice, riche en CO_2 , NH_3 , H_2O , H_2 , en conditions hydriques (par exemple réaction de Miller-Urey) (MILLER, 1953).

Les études modernes de géochimie suggèrent au contraire qu'entre -4,5,1 O^{11} et 3,8.10⁶* années (= présence de roches sédimentaires) un dégazage soudain a formé l'atmosphère primitive non réductrice, semblable à l'atmosphère actuelle (sauf l'oxygène libre, effectivement résultat récent de la photosynthèse). L'hypothèse de Holland (1972) d'une atmosphère réductrice, supposant du fer libre dans le globe avant la formation du noyau métallique, était incompatible avec la concentration en nickel du manteau terrestre (TUREKIAN et CLARCK, 1969). Ces auteurs en déduisent en outre l'importance des réactions dans le manteau entre H_2S et H_2O .. qui se retrouvent comme condition prébiotique (voir ci-dessous). Enfin SHIMIZU (1976) montre qu'une atmosphère réductrice (H_2 , CH_4 , NH_3) induit une élévation de température importante de l'atmosphère... ce qui entraîne la dissipation dans l'espace (en 1 million d'années) du méthane CH_4 et de l'ammoniaque NH_3 . L'atmosphère semble donc bien n'avoir jamais été réductrice.

Nous venons de voir (p. 67) que la thermodynamique du non équilibre fondée sur des interactions simples en milieu homogène a conduit à établir que les systèmes vivants, nécessairement ouverts et exergoniques, peuvent avoir été en partie structurés par des nucléations thermodynamiques, mais que ceci est très loin d'expliquer les structures biologiques.

Nous avons également vu qu'à une échelle beaucoup plus faible, moléculaire, les systèmes pouvaient spontanément s'organiser notamment en raison des propriétés polaires des molécules et que *a contrario* l'entropie pourrait être considérée comme liée à l'ordre (ou plutôt comme un "accélérateur" de l'ordre, cf. DANCHIN, p. 68).

Les études paléontologiques montrent des "traces de vie" sous formes d'organismes fossiles carbonés dès -4 milliards d'années.

Les études de biologie moléculaire, comparant les séquences des acides nucléiques nécessaires à la synthèse des protéines conduisent WOESE et FOX (1977), à diviser le monde vivant en trois phylums majeurs, les archéobactéries, les eubactéries et les eucaryotes, les premiers étant les plus primitifs et ayant des caractères communs aux deux phylums suivants. Les bactéries auraient été observées dès les premiers sédiments (-3,8 milliards d'années)...

Remarquons enfin que la source énergétique actuelle majeure de la vie est fondée sur la photosynthèse. Cette dernière implique d'emblée une organisation très sophistiquée (p. 133) incompatible avec un organisme primitif. Un système écologique non photosynthétique a dû acquérir une certaine homéostasie et une permanence (= continuité vitale) par rapport au sur-système écologique (entour) auquel il appartient bien avant l'acquisition de l'aptitude photosynthétique.

De ces divers acquis, tantôt factuels (fossiles, propriétés physicochimiques fondamentales), tantôt plus hypothétiques (résultant d'interprétations qui risquent après réfutation d'être rejetées), il ressort des contradictions telles celles entre

géochimistes (atmosphère primitive oxydante) et nécessités biochimiques (milieu réducteur) soulignées par OZIMA et MARTY (1983).

Néanmoins, ces contradictions apparentes s'effacent si l'on considère ce problème de façon plus globale, en envisageant les diverses interactions physiques intervenant dans l'écosphère simultanément (notamment gravité et toutes les interactions électromagnétiques, y compris de Van der Waals).

De toute évidence la vie initiale est liée à des solutions hydriques, à des composés carbonés, à des systèmes ouverts exergoniques, à une organisation initialement monocellulaire, à des conditions réductrices, à un système dont l'entrée énergétique est non photonique : les archéobactéries sont les formes actuelles les plus proches de ces premiers systèmes écologiques devenant partiellement autonomes (autorégulés) vis-à-vis de leur milieu.

A cet égard, la récente découverte de l'importance de la vie associée aux sources hydrothermales des crevasses océaniques nous donne probablement une sérieuse indication des modalités de la vie primitive. Dans ces milieux des organismes très évolués (notamment animaux) dérivent leur énergie de bactéries chimolithotrophes (vivant à partir d'une source énergétique minérale) essentiellement à partir de SH_2 , en très haute température jusqu'à 250°C "compensée" par une forte pression (250 bars). Ces structures ont une activité biologique intense (une génération bactérienne toutes les 48 mn à 250°C , BAROSS et Demmü Y, 1983) dans des solutions acqueuses, réductrices, probablement riches en ions ammonium.

Notons qu'un tel milieu est par ailleurs structuré par l'existence d'un système poreux (porosphère sol) où les courants cavitaires et où les gradients thermiques peuvent entraîner des phénomènes de nucléation de Bernard-Raleigh, propres à organiser un emballage cellulaire et où les conditions de synthèse des molécules organiques primitives (NH_3 , CH_4 , CO_2) à l'interface milieu réducteur énergétique/milieu oxydant semble satisfait dans un système riche en catalyseurs minéraux (argiles, nickel, ...).

La soupe océanique primitive en milieu réducteur imaginée par certains... pourrait n'avoir été effective que dans des microlocalisations où les conditions physiques, chimiques et énergétiques créent des conditions à relativement haute probabilité (régularité des processus) pour l'apparition d'une première cellule vivante autoreproductrice, un premier sous-système écologique de nature biologique... concomitant avec le développement des premiers sédiments.

Remarquons que la différence de potentiel d'énergie biochimique (p. 133), moteur biophysicochimique des écosystèmes, nécessite un couple réducteur/réduit avec gradient et qu'en conséquence ces sources sulfureuses hydrothermales réductrices sont, en milieu oxydant, un couple d'oxydoréduction prolobiotique beaucoup plus efficace qu'une atmosphère totalement réductrice. Contrairement à ce qui est souvent admis, dans de telles conditions, une atmosphère oxydante favorise l'apparition de la vie en créant un gradient oxydo-réducteur.

La vie apparaît alors comme une résultante relativement probable de l'évolution fondamentale de la surface de notre planète, ayant d'abord produit son atmosphère et son hydrosphère... ; puis cette organisation vitale a pu secondairement tirer partie du flux énergétique essentiellement photonique qui active les réactions physicochimiques superficielles du globe, notamment à partir des émissaires hydrothermaux réducteurs non abyssaux.

Ainsi des portions d'espace se sont organisées en série de réactions coordonnées, avec parfois système de coordination ; il s'agit de systèmes structurés (puisqu'organisés) morphofonctionnellement, s'inscrivant eux-mêmes dans un espace physicochimique structuré et ayant des réactions dans des conditions relativement restreintes favorisées par des catalyseurs guidant les réactions. Notons que cette structuration physique spatiale peut avoir elle-même à l'échelle moléculaire joué un rôle expliquant la correspondance acide aminé/nucléotide, simultanément apparues dans une phase prébiotique selon l'hypothèse de F. EGAMI (WE1QIN, 1981). Si ces

portions particulières d'organisation ont formé ce que nous appelons aujourd'hui la vie, celles-ci ne "fonctionnent" ou n'existent qu'à l'intérieur de systèmes thermodynamiques généraux où elles constituent des cas particuliers (vie) dans l'abios.

Ainsi, une organisation auto-entretenue et reproductible, s'est mise en place dans le système physicochimique auquel elle appartient, c'est la vie. A son niveau, trois propriétés peuvent être notées :

- les processus d'échanges (cinèses) y sont relativement intenses à l'intérieur et avec l'extérieur de ces systèmes,

- comme tout système écologique, le système vivant peut auto-évoluer, par modification de son auto-régulation, en d'autres termes, entraîne un nouvel état au temps t_2 à partir du temps t_1 (chaque être vivant procède d'un autre être vivant ou plus exactement il y a continuité vitale, p. 183),

- une organisation particulière, descriptible y existe et à quelques détails près (variations "individuelles") se répète à de nombreux exemplaires : il y a pour l'écologue opérationnellement identité, pour un niveau d'analyse de la composition, de ces sous-systèmes biologiques se répétant dans le champ écologique ; n'étant pas indépendant des systèmes dont ils procèdent, ils les décrivent en unités quasi homologues qui sont ainsi une bio-indication sur les systèmes écologiques (p. 95).

Ces systèmes vivants sont l'objet d'études spécifiques focalisées sur eux par la biologie qui, tout comme la physique et la chimie, a donné naissance à de multiples sous-disciplines spécialisées (chap. III).

1.6.3. Vie et écologie

S'il est tout à fait remarquable que l'organisation physicochimique des êtres vivants est particulière et a des propriétés d'organisation propres qui doivent être évidemment prises en compte ; l'écologie considère de façon neutre à la fois les systèmes physicochimiques auto-reproductibles, auto-organisés (= vitaux) et les systèmes physicochimiques, organisés par les structures moins individualisables de l'abios.

L'écologie n'est pas réductible à la biologie mais l'englobe pour partie (fig. 1-1, p. 29) ; elle est partiellement biologique. Si son objet d'étude, le système écologique inclut l'ensemble des organismes, l'écologie ne porte pas sur la structure interne, *Le* sur l'organisation intrinsèque de ces organismes. De même l'écologie n'est pas plus une science physique, au sens des seules organisations "élémentaires" du physicien, que chimique, au sens des organisations un peu plus complexes du chimiste, ou que biologique, au sens des organisations encore plus complexes du biologiste moléculaire ou du morphologiste, ou du géologue. Elle considère ainsi les organisations globales telles celles de l'écosphère, ou plus local (tel un sol) qui sont, du point de vue des disciplines académiques, biophysicochimiques.

A son échelle synthétique d'observation l'écologue est donc condamné à échanger intensément avec des disciplines plus analytiques et à organiser les acquisitions et traitements des informations au niveau de l'organisation biophysicochimique de l'écosphère qui est son objet d'étude ultime (cf. 2ème partie).

L'ignorance partielle des conditions précises, ou encore des étapes intermédiaires, ayant conduit à la différenciation des sous-systèmes vitaux ne présente pour l'écologue qu'un inconvénient mineur. Il faut toutefois retenir, et c'est essentiel, que les systèmes biologiques n'ont aucune différence fondamentale avec les systèmes physicochimiques dont ils ont toutes les propriétés et dont ils sont des parties. Ces systèmes biologiques ne sont que des entités locales, dans l'espace de l'écosphère, respectant les lois physicochimiques mais ayant en propre une organisation très élaborée tendant à l'homéostasie (au maintien) notamment par une

reproduction. Ce type d'organisation n'est enfin possible dans l'espace que dans des conditions relativement restrictives : la vie est très limitée aux interfaces où les échanges biophysicochimiques nécessaires à celles-ci seront thermodynamiquement possibles. Or nous avons vu, au paragraphe 1.6.2., que cette organisation n'a pu apparaître que dans des conditions très précises dont elle garde, malgré son évolution ultérieure, largement les exigences. Ce n'est notamment qu'avec les seules interactions électromagnétiques (et gravitationnelles) que cette organisation fonctionnelle s'est développée : c'est autour des interactions les plus faibles (dipôles électriques, p. 59) qu'elle s'organise (les liaisons plus fortes intervenant dans les étapes réactionnelles ; ce sont les ponts hydrogènes, lipophiles, hydrophiles,... qui structurent l'espace biologique, p. 67).

Enfin, notons que les codages et contrôles se font à l'échelle atomique ou pluriatomique (moléculaire), au niveau de miniaturisation le plus poussé possible, avec les niveaux d'énergie prévalant, en continuité, à la surface du globe, dans l'écosphère actuelle.

L'écologie s'intéresse aux interactions des organismes avec leur milieu (composé d'autres organismes mais aussi de l'espace physicochimique où la vie est possible). Elle envisage à la fois les parties organisées sur ces bases "simplement" physicochimiques et les portions vivantes d'espace. Dans l'écosphère l'interpénétration de la vie dans l'abios est totale ; la vie ne diffère de ce dernier que par un mode d'organisation et ne peut exister que dans, et par, celui-ci. Cette indissociabilité vie-abios est à la fois "congénitale" à la vie et inhérent à son organisation et fonctionnement, à toute échelle envisagée par l'écologue.

Mais, les idées issues des siècles passés opposant vie et non vie, et imposant un créationisme transcendant, ne sont pas totalement évacuées. Il faut reconnaître qu'il était historiquement difficile et méthodologiquement nécessaire de ne pas aborder simultanément toutes les questions que pose l'organisation du champ écologique : le créationisme a permis de laisser de côté bien des problèmes et facilité la classification de la partie vivante de la biosphère. La classification linnéenne, créationiste, que nous affinons et complétons tous les jours a d'une certaine façon favorisé la naissance de la biologie (p. 250)

Cette position vitaliste a entraîné en écologie un certain biocentrisme, une focalisation sur la partie vivante et non sur l'ensemble du système biophysicochimique de l'écosphère. Par exemple, des concepts comme ceux de population, biocénose (qui s'opposent respectivement à démotope, biotope) éclatent les systèmes écologiques et séparent arbitrairement (du point de vue fonctionnel) les composants des écosystèmes. Un réductionisme facile (et souvent des applications justifiées) tend à organiser nos études écologiques à partir du vivant (p. 193) et crée encore aujourd'hui une distorsion importante dans la collecte des informations concourant aux généralisations sur les systèmes écologiques. L'écologue, qui n'a souvent reçu qu'une formation de biologiste, se devra dans l'avenir de "gommer" cette coupure vie/abios thermodynamiquement, donc fonctionnellement, artificielle et largement a-scientifique. Cela ne signifie pas que les approches écobiologiques ne soient pas justifiées mais simplement qu'elles ne peuvent se substituer à l'écologie *stricto sensu* et qu'elles ne prennent toute leur signification qu'après intégration dans leur cadre écologique.

1.6.4. Le métabolisme

La structure biophysicochimique de l'écosphère implique un enchaînement de réactions physicochimiques dont certaines sont assurées à l'intérieur d'êtres vivants ; ces chaînes réactionnelles "traversent" répétitivement vie et abios.

Les réactions biochimiques internes aux organismes sont organisées grâce à des structures d'échelles diverses : moléculaires (telles les protéines), ultrastructurales

(tels l'ergastoplasme et les mitochondries), microscopiques (telles les membranes et cellules), et macroscopiques (tels les organes, le système circulatoire). Elles sont enfin régulées (= rendues possible ou non) grâce à des catalyseurs (p. 63), les enzymes qui, par leur présence, permettent qu'une réaction biochimique se produise, ou non, dans les conditions de pression et de température normales au lieu de vie de l'organisme.

Ces enzymes ont une abondance et une localisation dépendant de leur taux de production. Ce sont des protéines c'est-à-dire des chaînes d'acides aminés linéairement liées par des liaisons covalentes. Ces enchaînements de monomères (acides aminés) en polymères (protéines) ne sont pas quelconques mais correspondent à un code. Il y a pratiquement 20 acides aminés qui constituent les lettres (20 caractères) d'un mot qui peut être très long. Il n'est pas de notre propos de rappeler la composition de chacun de ces acides aminés mais simplement de remarquer que ces 20 acides aminés enchaînés se présentent sous la forme d'un épi qui a, vers l'extérieur, 20 têtes différentes ayant des sites de polarisation spécifiques (p. 58).

Cette configuration de l'enchaînement des acides aminés entre-eux reflète les liaisons chimiques covalentes des monomères de la protéine.

Cette chaîne d'acides aminés peut être relativement courte (on parle alors de peptides) plus longue (polypeptides), longue et très longue (protéines). Ceci peut se mesurer en comptant les acides aminés. (L'histone est une protéine à 102 acides aminés jouant un rôle essentiel dans la compaction de l'ADN du noyau. La fibrinopeptide du sang n'a que 14 ou 16 acides aminés, etc.). Ceci peut s'exprimer en masse moléculaire (somme des masses atomiques) dont l'unité est le Dalton.

Mais la configuration spatiale réelle d'une protéine n'a pas la linéarité d'un très long mot formé de caractères. La chaîne s'enroule sur elle-même en spirale (structures secondaires) en établissant des liaisons spontanément sur elle-même, dans la solution aqueuse dipolaire de l'eau par le jeu de forces de Van der Waals, liées à la polarisation des nuages électroniques des radicaux externes des acides aminés en épis. Notamment par des ponts hydrogènes, par exemple associés à un oxygène. Cette contraction spatiale, usuellement spiralisée constitue la structure secondaire. Un pelotonnement (structure tertiaire) de la spirale sur elle-même est enfin possible, notamment chez les enzymes.

Le site actif d'une enzyme résulte d'une localisation précise en un lieu (= locus) de cette macromolécule. La configuration moléculaire externe (= structure tertiaire) favorise en un locus le rapprochement, à l'échelle atomique, de molécules convenablement orientées qui accroissent ainsi considérablement leur probabilité réactionnelle : en cela les protéines enzymatiques guident les réactions et les catalysent.

Ce guide enzymatique abaisse très sensiblement les seuils thermiques réactionnels. En fait, il accroît par "structuration polaire" de l'espace la probabilité de rencontre de molécules précises pour des réactions spécifiques et rend possible les réactions biochimiques, car souvent les molécules en cause seraient "dénaturées" (détruites) à la température où la simple agitation thermique permettrait une occurrence réactionnelle significative. Les protéines catalytiques guident et ainsi organisent les réactions organiques.

Ces réactions biochimiques sont nécessairement exergoniques (p. 57). Le propre des enzymes permettant ces fonctions est de s'associer à des co-enzymes tel l'ADP qui se charge d'une énergie de liaison libérée par catabolisme (U) pour la transporter ailleurs grâce à une liaison covalente supplémentaire avec le phosphore ($\text{ADP} + \text{P} + \text{U} = \text{adenosine triphosphate} = \text{ATP}$). Les biologistes moléculaires utilisent cette unité de transport énergétique de la cellule pour mesurer les bilans réactionnels car l'organisme constamment synthétise et réutilise cette liaison $\text{ADP} + \text{P} + \text{U} \rightleftharpoons \text{ATP}$. (U = énergie = 15 Kcal/mole = 64,2 Joules/mole). La rupture des liaisons moléculaires - exergoniques - constitue le catabolisme de l'organisme. La synthèse de nouvelles liaisons (grâce au transport de l'énergie biochimique ou à ses apports radiatifs) s'appelle l'anabolisme. L'ensemble des réactions biochimiques de l'organisme (catabolisme + anabolisme), nécessairement couplées, forme le métabolisme.

L'incorporation des éléments minéraux simples n'apportant pas d'énergie biochimique (= liaisons covalentes utilisables en réaction couplée avec un transporteur énergétique) par anabolisme dans un ensemble organique assure l'organisation de ces éléments chimiques dès lors couplés à la matière organique. Inversement le catabolisme libérant des éléments (ou petites molécules contenant ces éléments) sans énergie biochimiquement utilisable par couplage réactionnel achève la minéralisation de cet élément.

Nous parlons ici d'énergie biochimique pour l'énergie susceptible d'être reprise, pour partie dans une liaison de transporteur d'énergie :

$ADP + P + 64 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \rightarrow \text{ATP}$ (mais aussi NADP-H, etc.).

Les éléments chimiques biogènes sont donc sous des formes minérales (non liées à du carbone réduit) ou organiques (liées à du carbone réduit). L'organisation des systèmes écologiques peut être décrite en termes de cycles (p. 164) où alternent les organisations par anabolisme et les minéralisations par catabolisme mais aussi par diverses lyses exergoniques extramétaboliques (enzymes libres, photolyses, hydrolyses, ...). Les formes minérales sont essentiellement assimilées puis organiquées par les plantes et les microorganismes, la distinction de ces deux mécanismes, souvent compétiteurs, conduit à distinguer l'organisation (dominante végétale) et la réorganisation effectuée grâce à l'énergie biochimique réutilisée par les microorganismes. DÜMMERGUES et MANGENOT (1970) préfèrent le terme immobilisation au terme impropre de réorganisation appliqué à ce processus microbien, mais la réorganisation n'est ni une immobilisation ni une réorganisation. WITKAMP (1971) considère l'immobilisation pour ce qu'elle est, un processus et non un résultat, qui intervient tant par incorporation dans les organismes (immobilisation biologique) que sur des colloïdes, à l'opposé il y a mobilisation depuis les matériaux du sol inorganiques et via la décomposition des matières organiques.

Il est hors de propos de décrire ici les multiples variantes des propriétés biologiques mais de rappeler quelques points essentiels propres à ces systèmes.

Les réactions exergoniques sous contrôle biologique sont fréquemment couplées à une réaction endergonique, telle que l'ensemble reste évidemment exergonique. De telles réactions couplées permettent une récupération chimique (biochimique) d'une part de l'énergie pouvant être réinvestie dans des synthèses biochimiques.

Par exemple, la majorité des cellules tirent leur énergie exergonique de l'oxydation de substrats organiques, tel le glucose. D'une façon générale, une cascade de réactions couplées d'oxydoréduction sont, biochimiquement organisées sous contrôle du génome de l'organisme. L'oxydation biologique des substances est couplée à la formation de liaisons covalentes labiles, telles celles d' $ADP + P + U = ATP$, décrit ci-dessus. Dans ce processus de "phosphorylation oxydative" une part de l'énergie initiale du substrat organique se trouve ainsi transférée sur une liaison labile standard. Au cours de cette phosphorylation oxydative, des échanges d'électrons e^- et protons constituent l'hydrodéphalation pendant laquelle ces échanges sont canalisés, c'est-à-dire orientés par rapport au plan des membranes phospholipidiques du cytosquelette (= système membranaire des cellules, eucaryotes notamment) grâce à des forces osmotiques et un gradient de potentiel électrique et de pli (concentration en ion H^+). C'est la théorie chimiosmotique proposée par P. MITCHELL (1966) qui explique ce processus essentiel de l'organisation spatiale bio-énergétique.

La remarquable organisation interne des réactions biologiques est aujourd'hui décrite et quantifiée par la biologie moléculaire. Les processus, très divers, se font dans les structures biologiques à toute échelle cellulaire, et, pour les organismes complexes, multicellulaires (des tissus, des organes, des individus). Les modalités de ce fonctionnement interne des organismes sont de mieux en mieux connues et sont en perpétuelle réévaluation du fait des progrès rapides de la physiologie sous-tendus par ceux de la biologie moléculaire. Ce serait sortir du cadre de cet ouvrage que d'en décrire les modalités, même très générales (tels les cycles de Krebs ou de Calvin),

l'écologie ne considérant que les relations des organismes avec leur milieu. Toutefois, l'écologue ne peut se désintéresser de la co-adaptation organisme/milieu rendue possible par une continuité des propriétés biologiques contrôlées par un codage de gènes, que nous aborderons au paragraphe suivant. Cette permanence signifie à la fois la permanence de la cohérence fonctionnelle de l'organisme et sa transformation par adaptation, en tant que sous-système du système écologique l'incluant (p. 205). En d'autres termes, l'écologie ne prend pas en compte les caractéristiques propres aux organismes en tant qu'objet d'étude final, mais leurs conséquences sur les relations organismes/milieu, lesquelles dépendent largement du "système" imposant aux organismes ses contraintes.

1.6.5. Organisation métabolique

Des réactions existent spontanément en milieu désordonné mais elles n'aboutissent qu'à d'autres réactions localement imprévisibles. L'organisation spatio-temporelle des organismes permet une maintenance de tout un système localement ordonné. Les molécules sont conduites, transportées, canalisées à travers des membranes ayant des polarités hydrophobes, enfin des catalyseurs (enzymes) permettent au "bon" moment une réaction biochimique spécifique (couplée ou non). Un tel ordre implique une organisation précise des processus tant l'ordre dans la structure des réactions (formes) que dans la régulation de la cinétique des fonctions.

Cet ordre est assuré, comme tout ordre, par une structure permanente à l'échelle de la durée de cet ordre. Le système physicochimique des organismes a une structure qui se maintient, malgré les aléas destructeurs du système où ils s'inscrivent (= milieu, p. 31), grâce à la réplication de cette structure et à sa multiplication, permettant de compenser les destructions. De cette manière, cette structure, ou plutôt ses copies, se transmettent de façon continue à travers le temps depuis le premier organisme ayant réussi à se maintenir. La diversité apparente actuelle des organismes recouvrent une très grande constance physicochimique fondamentale.

Cette structure, permanente par reproduction, est portée essentiellement par une chaîne d'Acides Desoxyribo-Nucléiques (ADN). Il y a 4 types d'ADN : l'adénine, la cytosine, la guanine, la thymine, notés respectivement A, C, G, T dans les descriptions moléculaires d'ADN. Chaque acide a comme noyau central un sucre, le desoxyribose (4 atomes de carbone, 1', 2', 3', 4' forment avec un oxygène un cycle) et les noyaux de desoxyribose sont liés mutuellement par une liaison phosphodiester "acide" (dans les positions 5' et 3' du desoxyribose). À l'inverse, sur la position 1 du desoxyribose est situé une base variant selon A, C, G, T enfin, la position 2' porte un hydrogène (donc un acide-base desoxygéné). La présence quasi permanente de ces acides enchaînés dans le noyau (nucléus) des cellules explique leur dénomination d'acide desoxyribonucléique.

La structure secondaire des molécules d'ADN est constituée par l'enroulement en spirale de deux polymères d'ADN associés par des liaisons hydrogènes (p. 59) spécifiques qui s'établissent entre les bases de telle sorte que les bases correspondent, soit C—G et A—T. Ainsi le double polymère d'ADN, "au repos", possède la structure d'une longue double hélice. La synthèse d'une nouvelle double hélice se fait par séparation des (faibles) liaisons hydrogène entre les bases (dédoublage de la double hélice) et par la mise en place en face de chaque polymère isolé des bases adéquates selon le lien C—G et A—T. Chaque polymère reconstitue le polymère complémentaire et il se forme ainsi une nouvelle double hélice à partir de chaque "demi double hélice". Le résultat est une duplication (= reproduction).

L'ordre des acides ACGT est très varié A-A-C, T-A-G,.... et il y a ainsi sur ces longues doubles hélices un ordre écrit dans un alphabet à 4 lettres : un message.

Ce sont les anomalies de réplication, les accidents de copies ou les perturbations du texte, par exemple, par une radiation ionisante, qui sont à l'origine

de nouveaux messages et de la diversification des organismes compatibles avec la variation de leur milieu (les autres étant inadéquats avec la transformation des systèmes écologiques, p. 177).

Ce message, pour être utile au métabolisme, doit être d'abord recopié en molécules plus réactives (le ribose porte alors un radical hydroxyde -OH en 2' et non un hydrogène comme dans l'ADN) composées d'Acide RiboNucléique (ARN) ayant également des bases fixées en 1' mais où la Thymine est remplacée par l'Uracyl, noté U. Cette copie de l'ADN en ARN est une transcription où un message A-A-C-T-A-G devient A-A-C-U-A-G par un processus de synthèse de l'ARN (= organisation de sa demi-chaîne semblable à la reproduction de l'ADN). Transcription et reproduction sont physiquement semblables mais l'ADN est destiné à être conservé pour mémoire, tandis que l'ARN n'a qu'une destinée transitoire. L'ARN porte le message sous une forme adéquate permettant la synthèse des protéines dans la cellule des procaryotes ou chez, les eucaryotes dans le cytoplasme de la cellule, après une mise en forme complexe au passage de la membrane nucléaire (l'ADN étant dans le noyau, mais aussi dans d'autres organites).

La synthèse des protéines se fera également par une transcription, celle de l'ARN en acides aminés. Les 20 acides aminés étant déterminés, mis en place face au message, selon 3 nucléotides chacun, par exemple, la phénylalanine le sera par la séquence UUU ou DUC, l'asparagine par GAU ou GAC. Des messages "stop" coupant les chaînes réactionnelles de polymérisation copiante des protéines (tel le message : GAG).

Chaque enzyme ainsi formée va constituer une propriété réactionnelle biochimique qui va agir dans l'organisme (endo-enzyme) ou hors de l'organisme, après excrétion dans le milieu (exo-enzyme). Cette propriété est le reflet, par copie interposée d'ARN, d'une séquence d'ADN des chromosomes des noyaux. Cette séquence est un gène porteur d'une propriété biochimique. Cette propriété n'est mise en oeuvre que si besoin est, des systèmes de rétroaction du contenu cellulaire sur l'environnement du gène régulant la production de protéines : il y a répression du gène en absence du besoin de la protéine correspondante. Les enzymes, fragiles, se dénaturent et sont resynthétisées, si besoin est, en permanence.

La machinerie biochimique d'un organisme est en fait d'une extrême sophistication. Les diverses substances pénétrant dans la cellule sont, chez les eucaryotes, canalisées vers des sites actifs où des protéines précises assurent leur transformation. Il y a une organisation fonctionnelle (p. 72) remarquable où des organites (— ultrastructure spécifique de la cellule) remplissent des fonctions précises grâce à leurs propriétés enzymatiques et membranaires. Le décryptage de l'ensemble de ces mécanismes a été largement acquis avec les progrès récents de la biologie moléculaire (voir par exemple l'excellent ouvrage d'ALBERTS *et al.*, 1983).

La vie a donc développé un code permettant de transmettre l'information d'individu à individu, de génération à génération sous forme d'Acides DésoxyriboNucléiques (ADN) qui contrôlent, entre autres, des mécanismes complexes la synthèse des ARNs, ARNs messagers..... la synthèse des catalyseurs (protéines) permettant la synthèse des... ADN, ARNs, protéines, parois, cellules, ... Ce système est dit homéostatique, car il se reproduit et se maintient par lui-même par rétroaction tant que les conditions thermodynamiques du milieu le permettent. Vis-à-vis de l'extérieur, il résiste aux aléas en tendant à croître en volume., en se scindant en sous-ensembles identiques (reproduction) avec éventuellement échange d'information (sous forme essentiellement d'ADN) entre sous-ensembles fonctionnellement homologues, c'est-à-dire quasi identiques (= reproduction sexuée).

Pour maintenir ces réactions, il faut que le système reste ouvert avec l'extérieur car l'ensemble des réactions couplées, organisées et codées doit avoir un bilan globalement exergonique. Il est nécessaire que l'énergie incidente "dégradable" compense les pertes dégradées et il faut corrélativement qu'il y ait entrée et sortie,

sinon il y a rapidement arrêt de vie. (En fait, les organismes peuvent avoir des réserves chimio-énergétiques permettant de limiter les conséquences d'arrêts temporaires de certains échanges). Cette contrainte interdit aux ensembles biologiques un volume d'échange trop grand ou plus exactement oblige à des surfaces d'échange vie/abios (ou organisme/milieu) importantes. L'échange milieu-organisme pouvant par ailleurs être amélioré par un renouvellement de l'un vis-à-vis de l'autre, soit par mouvement des organismes, soit par mouvement du milieu (surtout s'il est fluide) (p. 119).

Pour maximiser ces échanges la solution optimale est dans la constitution de petites unités offrant une surface d'échange considérable (la croissance "sphérique" augmente le volume beaucoup plus vite que la surface). Les organismes peuvent accroître leur dimension de façon filamenteuse (cylindrique) ou foliée (plane) pour permettre les échanges de l'organisme avec le milieu. Dans les deux derniers cas, la croissance de surface est proportionnelle au volume. La forme filamenteuse permet en outre une exploration dans le milieu par extension linéaire (réduction des aléas du milieu en augmentant les possibilités d'échange localisées) : c'est le cas des champignons à mouvement cytoplasmique intense, ou des racines à vaisseaux conducteurs. La structure foliée permet l'interception des flux (ex ; flux lumineux/feuilles). Ces avantages se payent toutefois de l'obligation d'organiser les transferts internes à l'organisme (cytoplasme, vaisseaux) accrus par l'augmentation des distances entre parties de l'organisme.

Echanges accrus impliquent aussi exposition accrue aux aléas : ces systèmes d'échanges ne peuvent être optimaux partout. Les organismes peuvent prospérer par ailleurs dans une vie en milieu fluide d'échange important (air, eau, animaux fixés des zones côtières marines) ou pour un déplacement dans le milieu (animaux mais aussi certains protistes) (p. 222).

Les organismes peuvent protéger leurs systèmes métaboliques ouverts, soit en s'installant dans des milieux naturellement protecteurs (tel le sol), ou/et en se protégeant par leur propre production d'épiderme, d'écorce, de carapace, d'épines, ... Une partie de ces protections est en fait excrétée (quitte le contrôle biologique) vers l'extérieur, telles les écorces, coquilles ou phanères, tandis que d'autres participent à l'organisme (hypoderme, panicules adipeux,...).

Les aptitudes, aujourd'hui très diversifiées et spécialisées des organismes, résultent d'une évolution biologique (p. 47), sommairement décrite au paragraphe 2.6., qui a fort diversifié les individus du monde vivant mais n'a pas changé fondamentalement les relations organisme-milieu, que nous allons décrire au plan général.

1.6.6. Le métabolon

Un organisme en tant qu'entité autorégulée par un code génétique porté par l'ADN (= génome) est un tout fonctionnel cohérent susceptible de contrôler dans son ensemble (sauf dérèglement organique accidentel) ses diverses réactions biochimiques et les mouvements internes qui les accompagnent : c'est un sous-système unitaire.

L'assimilation est la prise en charge, par ces régulations, des éléments chimiques, molécules ou photons "entrant" dans le système.

L'émanation est la sortie de radiations, éléments ou molécules chimiques de ce système.

Entre assimilation et émanation, s'il y a en permanence contrôle par un même codage biologique d'un ensemble biochimique spatialement unitaire, il y a un seul métabolon. <<Le métabolon est l'ensemble des molécules constituant un ensemble dépendant des régulations d'un même génome et dont les chaînes réactionnelles interagissent sans discontinuité spatiale>> (BOUCHE, 1978a).

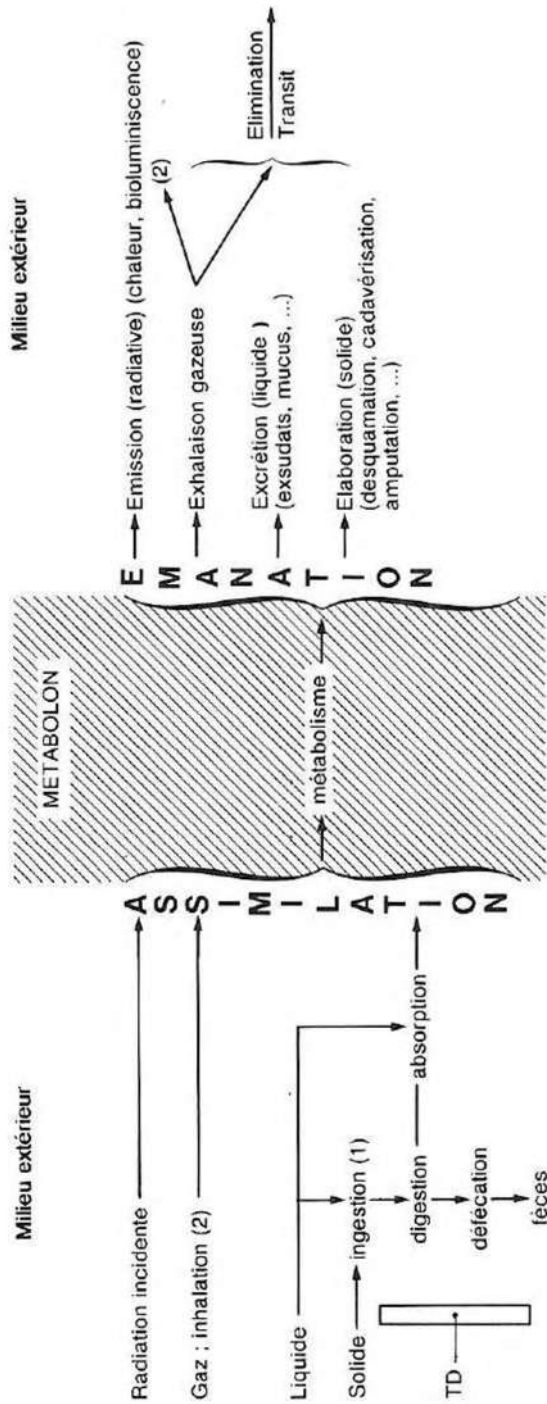


Figure 1-8 - Cinèses d'un métabolon généralisé. (1) a trait aux phagotrophes (protocistes, animaux ayant un tube digestif ou une vacuole digestive TD). (2) Inhalation + Exhalation = photosynthèse si le CO_2 est exhalé et respiration si c'est l'inverse.

Le métabolon ne coïncide pas avec l'"individu", d'ailleurs souvent difficile à reconnaître ou encore mal défini, car incluant classiquement des parties excrétées (phanères, écorces, coquille, ..) et des parties du milieu extérieur sélectionnées pour la digestion chez les phagotrophes (LWOPF, 1943). BERTILLON, dès 1873, souligne bien la limite fonctionnelle métabolon-milieu pour des phagotrophes <<... l'ensemble des influences que nous groupons sous la dénomination d'influences de milieux ; ce ne sont pas seulement les *circumfusa* qui nous entourent, mais aussi les corps étrangers que nous faisons pénétrer dans notre intérieur : air inspiré, boisson, aliments> >. 11 ne coïncide également pas avec les frontières morphologiques, en raison de la prise en charge par "assimilation" et perte par "émanation" dans l'ensemble du corps de l'individu notamment pour l'assimilation chlorophyllienne (organes ou organismes chlorophylliens) ou pour la radiation thermique d'énergie dégradée : le concept de métabolon n'est pas que morphologique (comme celui d'individu) mais morphofonctionnel. Une bouture de *Pélagonium*, un spermatozoïde, une écaille vivante de bulbe de *Lilium*, une spore de bactérie... sont des métabolons.

Les réactions de dégradation énergétique dans le métabolon peuvent être couplées à des réactions auto-entretenant le système biologique (<"/>. phosphorylation oxydative, p. 78). Hors métabolon, ces mêmes dégradations ne sont pas couplées. Ce qui ne signifie pas que leurs produits ne s'enchaînent pas dans d'autres réactions, mais que la perte d'énergie de la réaction n'est pas réutilisable pour partie de façon organisée à la manière des réactions couplant catabolisme à anabolisme dans le métabolisme.

Les chaînes dégradatives ("chaînes trophiques") des systèmes biophysicochimiques se présentent comme une succession d'échanges entre compartiments biologiques (métabolons) et éléments de transit entre ces métabolons. Les éléments de transit sont fonctionnellement strictement délimités par l'entrée chimio-énergétique résultant d'une émanation en amont et par une sortie en aval résultant d'une assimilation.

Les pertes énergétiques des chaînes trophiques doivent tenir compte des réactions exergoniques non couplées propres aux éléments de transit. Ces réactions exergoniques abiotiques peuvent être fortement influencées par des actions biologiques dont celle de la qualité des émanais, ou encore par les enzymes libres excrétées par les organismes dans l'abios ; elles peuvent aussi dépendre de différents facteurs abiotiques (photolyse, hydrolyse, température, acides, catalyseur non biologique, etc.).

D'après leur nature physique, les émanats se classent en quatre grandes catégories :

- les émanats exhalés, gazeux (CO_2 de respiration, de photosynthèse, CH_4 , ...),
- les émanats excrétés, moléculaires, fluides ou excréats (exsudats),
- les émanats solides de tissus élaborés (écorces, phanères, cadavres, ...) c'est l'élaboration de PETRUSEWICZ et MACFADYEN (1970), dont je propose d'appeler les produits : élaborais,
- enfin, les émanats radiatifs ou chaleur (et parfois bioluminescence) correspondant au bilan exergonique de l'organisme traduisant la dégradation énergétique.

Exhalaison, élaboration et excrétion sont donc les trois formes d'émanation qui débouchent dans l'élément de transit vers le métabolon suivant, la dégradation énergétique radiative se dissipant sous forme de chaleur (BOUCHE, 1978) ; une partie peut être investie en un travail de l'organisme contre le milieu.

La dégradation énergétique s'effectue également hors métabolon, et toute matière-énergie émanée n'aboutit pas nécessairement à un métabolon suivant dans la "chaîne trophique".

On appelle élimination la somme des exhalaisons, élaborations et excréations ayant quitté le métabolon (concept corrigé depuis PETRUSEWICZ et Mac f aü YEN (1970)

par SCHWEKDTEEGER (1975) et formalisé ici (fig. 1-8). Une partie de l'exhalaison (CO₂, O₂ par exemple) est non biochimiquement énergétique (= minéralisée).

La délimitation, en théorie stricte et en pratique confrontable à leur définition, des cinèses que constituent l'assimilation et l'émanation, permet une critique des données pour la modélisation (p. 157) d'écosystème (p. 107) qui sont des sommes, plus ou moins analysées, de métabolons et d'éléments de transit. Cinèses et compartiments (métabolons et éléments de transit) constituant les composants des systèmes écologiques analysables systémiquement par systémiquement (p. 91).

1.6.7. La biomasse

La biomasse peut être définie comme la somme de la masse des métabolons pris en considération. Se rapportant à la vie, cette masse "biologique" se réfère non seulement à une portion d'espace-temps mais aussi à un niveau de composition relatif à des organismes n'appartenant qu'à un taxon précis. C'est souvent le cas en raison de la spécialisation des écobiochimistes ; on parle ainsi de la biomasse d'une espèce en un lieu donné, d'un groupe d'espèces (biomasse aviaire pour les oiseaux) ou à des taxons encore plus généraux (biomasse végétale).

Dans la pratique, le concept de métabolon est rarement utilisé et le concept de biomasse se confond avec celui de la masse des organismes pris en considération.

Pour être utile, le concept de biomasse sous-entend en fait une quantification de l'importance des êtres vivants en restant exactement sur le même matériel biologique (par exemple dans une étude diachronique des variations de biomasse d'un même taxon) ; cette expression globale peut alors être assez fiable.

Mais pour la comparaison des groupes la biomasse devient une expression qui peut recouvrir des "réalités" très différentes intrinsèquement (par sa nature), et extrinsèquement (du point de vue où l'on se place).

L'individu n'étant pas le métabolon, il est fréquent d'inclure dans la biomasse des éléments qui ne font pas strictement partie de ce métabolon. C'est particulièrement le cas lorsque des excréments ou des élaborations restent physiquement adhérentes au métabolon sans y être fonctionnellement liées. Ainsi en est-il de l'écorce des arbres et des phanères des animaux qui sont pesés avec ceux-ci. La situation est particulièrement délicate lorsque ces excroissances atteignent des valeurs impressionnantes. C'est le cas de la coquille d'huître et du métabolon "huître" qui sera évidemment facile à isoler ; mais ce cas ne diffère pas fonctionnellement de l'exosquelette des arthropodes, partiellement excrété, et de l'endosquelette des vertébrés qui fait lui partie du métabolon (sous son contrôle). Une remarque analogue pourrait être faite pour les expressions de poids racinaire, certaines racines au moins pourront accumuler dans leur tissu, avant leur mort, une charge considérable de carbonate de calcium (98 % de la masse, JAILLARD, 1987) (fig. 2-5, p. 125). On pourrait échapper à cette inadéquation en exprimant les biomasses par rapport au carbone, mais ici ce sont les végétaux qui, fixant le carbone, n'en sont pas avares et l'accumulent dans leurs structures squelettiques, telles celles des arbres. La signification de tels tissus en terme de biomasse est très équivoque et en tout cas, difficilement comparable avec celle de micro-organismes ou d'animaux.

Une deuxième difficulté des expressions en biomasse a trait aux organismes phagotrophes. Leur masse est usuellement rapportée à une biomasse sans autres précautions. Or fonctionnellement et pondéralement, le contenu de la lumière intestinale (= l'endotène) ne fait pas partie du métabolon, c'est une portion du milieu extérieur, certes particulière, sélectionnée par l'individu et en cours de lyse digestive, mais ne faisant nullement partie du métabolon du phagotrophe.

Cette imprécision peut être considérée comme négligeable, tenu compte des erreurs de mesure, mais peut devenir tout à fait négligée à tort dans le cas de contenus intestinaux divers ou/et pondéralement importants. Par exemple, chez le

lombricien *Vignysa pupi* Bouché 1972, ce contenu intestinal représente 502 % (n = 10) du poids sec de la biomasse proprement dite.

Il résulte enfin de cette expression purement massique une distorsion intellectuelle nullement négligeable sur l'importance relative des êtres vivants et bien des interprétations reflètent ces erreurs.

L'une d'entre elles, naïve mais nullement rare, est de ne pas se méfier des expressions pondérales en masse sèche ou masse humide ("vive"). Il n'est pas rare de voir des tableaux, comparant animaux et végétaux, inclure à côté de végétaux (masse sèche), des biomasses publiées par des zoologistes habituellement en masse humide, en raison du caractère homéohydrique de la plupart des animaux.

L'autre, plus fréquente, est de considérer comme également "vivant" des biomasses fonctionnellement très différentes; de mettre sur un même plan le tronc d'un arbre et ses feuilles alors que les intensités d'échanges vitaux, les cinèses de ces systèmes sont radicalement différents. Le premier étant surtout un squelette inerte le second une structure d'échange milieu-vivant : c'est ici ajouter un endosquelette inerte à la "bio"-masse.

Mais où commencent et où finissent les endosquelettes, les réserves, les masses à vie limitée ? Comment comparer des masses vivantes à nécessité de maintenance comparable ? Il semble que la conversion des "biomasses" en "nucléomasses" (masse d'acides nucléiques) pourrait constituer la méthode la plus simple en rapportant ces parties vivantes à la fois à ce qui les organisent (innéats. p. 96) et à ce qui assure leur continuité (p. 203) c'est-à-dire exprime les besoins de maintenance des systèmes écologiques (CORTEX *et al.*, 1985, 1986).

D'une façon beaucoup plus générale, la biomasse est une donnée brute nécessitant pour la plupart des interprétations une conversion (p. 365). Pour les cycles des éléments (p. 164) c'est évidemment la composition élémentaire de ces biomasses qui est prise en compte ; pour la comparaison des maintenances les nucléomasses pourraient être utiles ; pour les calculs de transferts énergétiques l'énergie oxydable en bombe calorimétrique est utilisée ; etc.

Operationnellement, la mesure de la biomasse est toutefois une fréquente commodité aisément accessible. Beaucoup d'études plus "fines" (telle la composition en un élément chimique) y sont rapportées. Il ne s'agissait pas ici de critiquer cette pratique mais d'énoncer quelques difficultés opérationnelles résultant de ce mode d'expression central dans la gestion de très nombreuses données écologiques : la signification d'une valeur de biomasse doit être étroitement précisée dans le cadre de Descriptifs Techniques (p. 268) et la comparaison de biomasses ou de variations de taux rapportées à des biomasses doit être pratiquée avec doigté.

1.6.8. La nécromasse

Nous venons de voir (p. 82) que les métabolons produisent dans leur milieu des émanations de quatre natures : émissions radiatives (chaleur), exhalaisons gazeuses, excréments liquides et élaborais solides.

L'ensemble de ces émanats peut être bioénergétiquement totalement dégradé (CO_2 , O_2 , NH_3 , CO_3 , etc.) ou comporter encore de l'énergie biochimique. Ce produit posthume de la vie, susceptible de fournir de l'énergie au milieu, est la matière organique morte ou nécromasse (p. 137). Sa fraction gazeuse ou liquide est souvent très labile mais, par contre, la fraction élaborée peut être d'autant plus lentement dégradée que l'organisme l'ayant émané peut avoir introduit des composés très résistants ("antibiotiques"), dans sa propre structure tissulaire (p. 144). Ainsi, les tanins, localisés dans les vacuoles des cellules végétales, constituent chez certains végétaux un mécanisme de défense, par exemple contre la surconsommation foliaire d'herbivores (VAN HOREN, 1984). La sénescence des feuilles inclut un tannage des protéines en formant des corps bruns caractéristiques de feuilles mortes (brunissement). Ces corps bruns sont difficilement dégradables pour de nombreux

nécrophages (Enchytraeides, de nombreux Microarthropodes) (TOUTAIN, 1987). Le milieu arrive ainsi à recevoir des substances énergétiques (pratiquement comportant des composés carbo hydrogénés réduits), potentiellement (peu) dégradables qui s'accumuleront d'autant plus que leur transit intermétabolite est long (p. 157). Le sol en est souvent le réceptacle pour des raisons gravitaires évidentes.

En un lieu, cette nécromasse ne sera nullement proportionnelle à l'émanation de la source productrice mais sera aussi fonction de sa dégradabilité (p. 139). La dégradabilité étant à la fois la possibilité d'une dégradation physicochimique extramétabolique et d'une assimilation végétale ultérieure (conduisant à un métabolisme dégradeur).

1.6.9. Carbonates, minéralomasse et chéradomasse

La biomasse a une organisation énergétique propre. La nécromasse constitue souvent un "pont" énergétique entre éléments vivants, car elle est le moyen de transfert (= somme d'éléments de transit) entre ceux-ci. Les substances totalement sans énergie biochimiquement utilisable sont dites minéralisées. Elles constituent la chéradomasse (du grec : *Cherados* = limon, sable, boue, gravier, débris, in BROWN, 1956). La chéradomasse et la nécromasse forment les expressions massiques de la partie abiotique des solides et des fluides (gaz, eau, ...) circulant dans les écosystèmes.

La chéradomasse se rapporte à la partie du système ne pouvant potentiellement pas fournir d'énergie biochimiquement utilisable par les organismes (carbohydrogénés) ; elle ne doit pas être confondue avec la minéralomasse : masse des éléments chimiques de la biomasse restant après minéralisation artificielle de la biomasse (cette minéralisation est au plan technique, soit chimique, soit physique par calcination) ; la minéralomasse est une fraction de la biomasse.

La chéradomasse d'un écosystème a des origines très complexes, soit issue de roches ignées fort anciennes, précédant la vie, soit issue d'une minéralisation de la nécromasse, soit directement produite par les êtres vivants par excrétion ou sécrétion, telles les sécrétions intravacuolaires de *Brachypodium ramosum*, à l'origine d'un sable (sable cytogénétique, fig. 2-5, p. 125), telle l'excrétion de concrétion de calcites par les vers de terre ou encore telle la production de diverses coquilles ou squelettes fossilifères. A ces actions d'excrétion ou de sécrétion directement liées au métabolisme, il faut associer les actions "télémétaboliques" (= distante des organismes) qu'entraînent la dissolution des roches ou leur éventuelle formation par précipitation en fonction par exemple des échanges de $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_3\text{H}_2$ intervenant dans la phase aqueuse de l'abios. Elles se concrétisent par des excrétions d'acides organiques ou d'enzymes libres, très importantes dans les sols, et susceptibles d'agir sur de nombreux constituants de l'abios. Ces mécanismes jouent un rôle parfois spectaculaire (dépôt carbonate ou dissolution des roches calcaires), dans les échanges abiotiques/biotiques des écosystèmes.

1.7. Systémique écologique

1.7.1. L'information en écologie

L'information a plusieurs significations, non indépendantes les unes des autres. Ces significations ont une valeur opérationnelle très variée en écologie, de sorte qu'une certaine clarification s'impose.

Au sens générique, au sens large, couramment utilisé sans précision particulière, c'est la communication à un public par quelque média que ce soit. L'information décrit le transfert de connaissances entre humains. C'est l'information diffusée par l'écrit, par les réseaux ou/et les images.

Mais en écologie, à la suite de MARGALEF (1957, 1968) le concept d'information a été appliqué, non plus à l'information issue des études écologiques, mais à l'objet de l'écologie lui-même en considérant les systèmes vitaux << world of life >> comme des systèmes cybernétiques (WIENER, 1948) : c'est l'information contenue dans les systèmes écologiques, perçus comme supports de celle-ci, qui est en cause. A ce stade deux attitudes peuvent exister, d'une part, celle, rare, de l'écologue se référant à l'ensemble des systèmes écologiques et d'autre part, celle des écobioécologistes.

MARGALEE, et de nombreux écobioécologistes, appliquent ces concepts directement aux individus, et seulement aux individus, en réduisant le sens "écologie" à une signification essentiellement biocentrique. <<Ecology, I claim, is the study at a level Ln which individuals or whole organisms may be considered elements of interaction, either among themselves, or with a loosely organized environmental matrix.... My aim is only to state the context in which I believe it is possible to speak of a theory of ecology>> (MARGALEE, 1968). Cette "information" considère essentiellement les individus comme éléments d'information des systèmes biologiques des biocénoses, confondues avec des écosystèmes. Elle exclut explicitement l'information contrôlant dans chaque individu son fonctionnement physiologique (.... essentiellement son support ADN) - le mode génétique.

MARGALEE est conduit à distinguer synthétiquement trois canaux de transfert d'information à travers le temps : le canal "écologique", le canal génétique et le canal culturel. Il regroupe dans ce dernier l'information transmise entre êtres vivants par ["éducation" au sens large. L'ensemble formant le canal biologique de transfert d'information. Evidemment, le canal écologique est improprement nommé, ou plus exactement résulte de la définition restrictive et incorrecte adoptée par l'auteur. Je propose de le nommer écobioécologique, car il est loin de regrouper toute l'information sur les systèmes écologiques, notamment celle relative aux structures abiotiques physiques et chimiques.

Nous devons ici revenir, en écologie, au sens cybernétique de l'information. La cybernétique est une "science", portant sur les procédés de communication et de contrôle des informations, visant à créer les lois qui gouvernent un système soumis à des informations. Il s'agit en fait beaucoup plus de procédures techniques que de science (cf. p. 105, l'appréciation de R. TLIOM).

Tout système cybernétique complet comporte une entrée, un traitement des informations et une sortie aboutissant à une utilisation et/ou à l'entour, enfin une mémoire pour stockage à tous les niveaux et restitution pour le traitement (fig. 1-9).

L'un des points importants est le fait qu'il y a rétroaction des sorties sur les entrées directement, ou via mémoire et via entour ; cette rétroaction prend un temps de transmission de l'information.

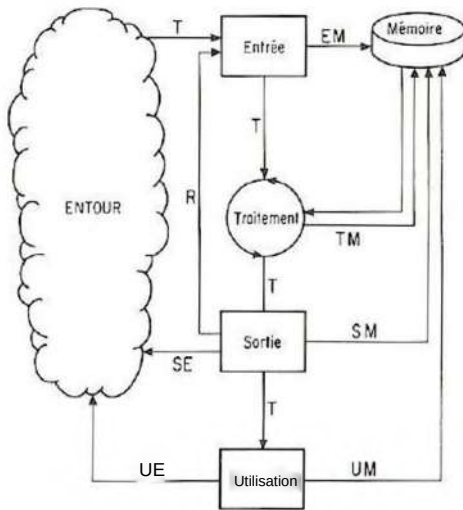


Figure 1-9 - Schéma cybernétique classique.

L'information est transformée (T) par une entrée pour un traitement et une sortie conduisant à une utilisation agissant sur l'entour.

L'existence d'une mémoire permet le stockage de données d'entrée (EM) en cours de traitement (TM) à la sortie (SM) et sous forme de résultats utilisables (UM). Une rétroaction (R) sur l'entrée permet les bouclages du système. La sortie peut agir directement sur l'entour (SE) ou via des modalités d'utilisation (UE). Notez qu'à la différence des systèmes écologiques, les systèmes cybernétiques restent physiquement constants dans le temps et l'espace ; la rétroaction agit sur les mêmes structures du système (même si leurs contenus ont changé entre l'entrée et la rétroaction).

MARGALEF, n'envisageant concrètement que les aspects biocénétiques de régulation biologique, insiste à juste titre sur le délai temps. L'état antérieur d'un peuplement induit les possibilités de développement de l'espèce en cause, mais aussi une régulation, telle la croissance d'un prédateur grâce à la fréquence accrue des proies, conduit à une rétroaction stabilisatrice (décroissance des proies). Cette rétroaction (négative) sur le peuplement est stabilisatrice. Faute de celle-ci, le simple effet de croissance entraîne une rétroaction de croissance (plus nombreuses reproductions entraînant une descendance encore plus importante) et une rétroaction positive ou "disruptive" (= explosive) !

Une autre forme du mot information est celle employée par les théoriciens de l'information. L'information est alors définie initialement comme l'ensemble des "données" fournies à un être vivant, à l'homme par exemple, ou à certaines machines par l'entour. C'est l'ensemble des "données" fournies à un système récepteur (vie + ■ abios) 1) par l'émetteur, 2) par le système extérieur ou 3) par ce système lui-même par rétroaction.

Le mot donnée est pris ici au sens d'élément d'information (c'est le sens dans cet ouvrage : p. 265) qui peut être transmis entre systèmes ou dans le système grâce à un mode commun et qui peut être interprété suivant la théorie de SHANNON et WEAVER (1949) où la quantité d'information désigne ce qu'une série de données apporte de nouveau ("d'imprévisible") au récepteur.

Moins une donnée particulière est attendue, moins elle a de chance d'apparaître, plus elle transporte une information importante. A l'opposé, la redondance indique des données (ou ensembles de données) identiques qui parviennent répétitivement au récepteur. La quantité d'information (i) apportée par chaque donnée peut être alors pondérée et exprimée par la probabilité (p) du signal transmis ($i = -\log p$).

C'est sur ce dernier cas qu'en écologie opérationnelle, la quantité d'information apportée par des données issues d'un système écologique sera appréciée car c'est la seule mesurable sans restriction sur les systèmes écologiques. Les systèmes considérés étant alors écologiques (= biophysicochimiques) et non exclusivement biologiques. Toutefois, cette appréciation porte sur la globalyse (p. 37) de l'objet écologique : elle est opérationnellement utile, mais traduit notre perception sur cet objet, non nécessairement son rôle dans le système écologique. La quantité d'information ainsi appréciée ne nous renseigne pas sur sa signification qui peut être soit descriptive (PRAC de comparaison typologique) soit systémique (FRAC systémique) (p. 357).

L'analyse des facteurs du milieu a conduit un zooéthologiste (UEXKUELL, 1921) à une définition synthétique de l'Umwelt comme l'ensemble des facteurs agissant sur un animal soit comme élément d'information par les signes apportés (Merkwelt) soit comme facteurs écophysiochimiques d'action (Wirkwelt). Cela revient à distinguer dans les échanges de matière-énergie systémique ce qui serait échange de signaux informatifs et ce qui serait matériel, alors que les deux sont liés et le dernier est seul concret, le premier résultant d'un jugement de valeur.

Bien des difficultés subsistent entre données écologiques et les concepts sur les informations jouant un rôle dans les systèmes écologiques.

Fonctionnellement, une donnée (élément d'information) redondante ou au contraire très informative nécessite d'être émise et reçue par deux objets (ou le même rétroactivement dans le temps) (= deux objets dans l'espace-temps), ce qui implique un "code" commun entre eux. C'est le cas dans certaines rétroactions identifiables mais ce n'est pas le cas de "données écologiques" quelconques. Remarquons également que plus un élément d'information est exceptionnel, plus il est informatif, mais plus il est exogène au système émetteur-récepteur, plus la réception risque de ne plus être assurée.

Les systèmes cybernétiques sont appliqués aux systèmes écologiques au prix de quatre simplifications arbitraires importantes :

- 1) les individus sont pris comme identiquement porteurs d'informations... ce que rien ne prouve,
- 2) les individus biologiques représentent seuls l'information écologique, ce qui est évidemment faux et même grossièrement faux. La structure physique des écosystèmes est probablement infiniment plus constante (et stabilisatrice) que la fraction biotique, aux composants labiles,
- 3) l'analogie transmission matière-énergie et transmission d'informations n'est pas homologie : c'est même totalement faux. Nous avons notamment vu, au paragraphe 1.5.4., qu'il n'y a pas analogie entre négentropie et acquisition d'information,
- 4) les systèmes cybernétiques ne sont pas morphologiquement modifiés par leur fonctionnement (ou alors il y a panne) ; les systèmes écologiques le sont.

En résumé, trois acceptions de l'information sont utilisées :

- 1) l'information au sens générique, *lato sensu*
- 2) l'information spécifiquement cybernétique, conduisant en écologie à un discours fonctionnel sur les systèmes rétroactifs au nombre desquels on pourra distinguer
 - 2a l'information écologique comprenant simultanément l'information écobiochimique et l'information physicochimique,
 - 2b l'information génétique,
 - 2c l'information culturelle,

l'information biologique étant écobiochimique, génétique et culturelle, cette information est censée jouer un rôle de contrôle dans les systèmes écologiques qu'elle ne contrôle toutefois que partiellement,

- 3) l'information opérationnelle, ou quantité d'information expressément technique, mathématique, de l'information apportée par un ensemble de données

représentant notre connaissance {— globalyse) sur un système. La notion de système est une abstraction directement concrétisable (p. 43) : les systèmes écologiques sont concrètement distincts des systèmes cybernétiques.

Nous serons amenés à revenir souvent sur les inconvénients résultant des importations théoriques par analogie. Stimulantes intellectuellement, celles-ci sont souvent également pernicieuses car leur valeur générale n'est souvent probante que par le passage d'une analogie à une homologie, avec oubli des conditions restrictives d'usage.

Alors que leur signification profonde n'est souvent qu'allégorique, ces transpositions sont trop souvent présentées comme cadre conceptuel théorique.

Constatons qu'en écologie les systèmes décomposables en compartiments n'échangent que par cinèses temporospatiales de matière-énergie, ces Cinèses transformant (p. 46) ces compartiments. Nous ne savons pas exprimer les cinèses et leurs conséquences transformantes sur les compartiments biophysicochimiques en termes d'informations. En conséquence, il vaut mieux parler opérationnellement de la nature concrète de ces systèmes que d'une analogie cybernétique invérifiable : les composants systémiques portent sur de la matière-énergie, pas sur l'information.

Par contre, dans cet ouvrage il est opérationnel et même essentiel de considérer l'information dont nous disposons sur un système. Cette partie perçue, la globalyse, est formée d'une somme de données initialement acquises sur ce système puis mémorisées, traitées, réorganisées... avec des moyens de transmission, filtrage, etc., d'informations élémentaires quel que soit le support de transmission, verbale, papier, électronique, ... Cette information est non seulement analogue mais homologue avec celle de la "théorie de l'information". Dans cet ouvrage le mot information au sens opérationnel sera employé pour désigner des données acquises depuis les systèmes écologiques, tels qu'ils sont perçus par l'écologue (de l'extérieur), et non sur l'information mémorisée par ces systèmes. Une seule exception ; l'information génétique des systèmes biologiques est concrètement transmise pour une bonne part, par un support ADN-ARN dans les sous-systèmes biologiques. Toutefois, cette information mémorisée par une partie des systèmes écologiques n'est actuellement pas quantifiable ; elle ne sera donc ici évoquée que qualitativement.

Il est évident que le choix retenu ici est relatif à l'écologie et désigne donc l'information écologique ; un informaticien aurait fort justement d'autre type d'information à l'esprit, telle l'"information traitante" des logiciels (MORVAN, 1986). (le choix est indispensable à une écologie opérationnelle assurant son développement intrinsèque, mais n'exclut évidemment aucun autre usage hors cette discipline.

1.7.2. Les systèmes écologiques et systèmes

Dans le paragraphe 1.6.1. nous avons déjà souligné que l'étude écologique porte sur des systèmes avec ce que cela comporte d'organisation d'états et de cinèses reliant ces états.

Pour chaque objet d'étude, on considère nécessairement un ensemble et ses parties directement constitutives dénommées compartiments. Ces compartiments et les cinèses (= les échanges entre compartiments) constituant le système étudié. Du point de vue où l'on se place, ces compartiments peuvent, dans un deuxième temps, être à nouveau analysés en parties plus élémentaires car ils sont également des systèmes. Il y a ainsi emboîtement des systèmes comme une table gigogne.

Nous pouvons acquérir de l'information sur ces systèmes selon le niveau d'observation (p. 33) choisi dans le champ écologique (p. 35).

Opérationnellement, pour un objet d'étude (étude élémentaire) on ne considère que deux niveaux : le système et ses composants (composants : compartiments et cinèses). Ces compartiments étant des sous-systèmes. Par exemple dans le système écologique de fonctionnement d'une prairie .au niveau d'observation sol, nous avons

été conduits à opter pour les compartiments "lombriciens", "sol" et "plantes" (FERRIERE *et al.*, 1985). Notre globalyse (= perception mesurée) a été encore réduite par l'option de suivre préférentiellement l'azote marqué ^{15}N dans ces 3 compartiments, dont nous avons suivi les changements d'état pendant 40 jours. Ces changements d'état nous ont permis de calculer les cinèses dq/dt de transfert de l'azote au sol, et du sol aux plantes. Le système écologique observé porte sur les composants : 3 compartiments et 4 cinèses (transferts lombricien-sol-plantes, dans les deux sens). Le système étant, si l'on change de point de vue (de niveau d'observation) lui-même une partie d'un sursystème (telle une prairie) dans lequel il est inclus. Je propose d'appeler le système écologique élémentaire, constitué d'un système et de ses composants immédiats (= non décomposés à leur tour) "système". 11 s'agit d'une unité opérationnelle importante car la plupart des opérations initiales d'acquisition et d'interprétation se font en référence à ce concept dual (le blé d'un champ, l'azote de l'arbre, entre le contenant et les contenus immédiats. De même, la modélisation élémentaire à compartiments tend à simuler des systèmes tels un modèle à compartiments.

Pour éviter ce néologisme le terme holon (KOESTLER, 1967) eut pu convenir, mais son usage, initialement biologique, qui a été généralisé par ALLEN et STARR (1982), porte sur toute entité autonome et sur son entièreté < <Every holon has dual tendency to preserve and assert its individuality as a quasi autonomous whole ; and to function as an integrated part of (an existing or evolving) larger whole. This polarity between the self-assertive and integrative tendencies is inherent in the concept of hierarchy order ; and a universal characteristic of life. The self-assertive tendencies are the dynamic expression of holon wholeness, the integrative tendencies of its partness.>> (KOESTLER, 1967). De fait, O'NEILL *et al.*, 1986, privilégient largement la recherche de discontinuités écologiques pour délimiter les holons.

Le système ne pose pas cette condition et est la description d'un objet écologique considéré dans son tout et certaines de ses parues de niveau de composition immédiatement inférieur. L'intégrité fonctionnelle (l'autonomie), même relative, n'est pas nécessaire et serait opérationnellement. une gêne car en écologie elle n'existe pas. Ce terme limite bien une étude systémique élémentaire à ce couple ensemble et ses constituants immédiats. Un système ne comporte que deux niveaux, le système lui-même (comme un tout) et ses composants immédiats expliquant ce premier niveau. Si l'on étudie un seul niveau (en quelque sorte un 1/2 système) on ne peut rien expliquer, seulement comparer. Le niveau général est expliqué par les composants du système, et réciproquement, les contraintes du système sont celles du sur-système où ils s'inscrivent (il n'est alors plus qu'un composant de ce sur-système).

La notion de système en général peut s'appliquer à des structures fonctionnelles extrêmement complexes. Pour l'écologue, cela va de très "petits" éléments, tel un sous-système biologique représenté par une bactérie (un individu) jusqu'à l'écosphère intégrant non seulement toutes les bactéries mais toutes les biocénoses de la biosphère dans la diversité des biotopes. Une imbrication systémique considérable en résulte. Il en est ainsi des systèmes réels.

Opérationnellement, nous travaillons sur des systèmes et nous ne pouvons interpréter un tout qu'à partir de ses composants (fig. 1-10). La perception très généralement partielle des parties d'un système est l'ensemble des données sur ce système. Nous avons déjà discuté de la démarche analytique (p. 36) permettant de constituer ces ensembles, cette démarche introduisant des hypothèses d'options sur caractéristiques (p. 41) puis des propositions, hypothèses liées à la synthèse dont le résultat peut être validé vis-à-vis du système réel en cause.

Un système écologique est en effet modélisable, c'est-à-dire représentable par notre perception (= modèle) et simultanément observable comme système réel.

Le système est un système "minimal" aux compartiments connectés par des cinèses (appelés parfois de façon obscure "interactions"). Cela désigne l'objet "réel",

en fait, conceptuellement identifié connue tel et permettant en synthèse un modèle élémentaire. 11 peut être conçu suivant deux ou trois référendaire(s) (p. 37).

Suivant le référendaire temps, il peut ne comporter que les successions d'étal du même compartiment (en terme de systèmes, il s'agit d'une succession de compartiments "recevant" les états antérieurs ou innéats, cf. p. 96).

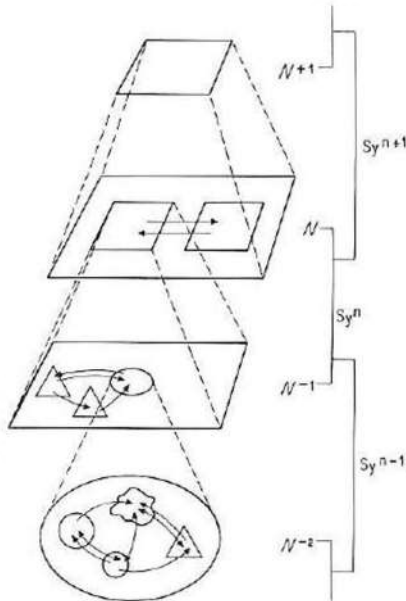


Figure 1-10 - Emboîtement des systèmes (Sy) dans les démarches analytico-synthétiques, par changement de niveau d'observation (N) dans les systèmes écologiques (voir aussi fig. 1-2, p. 36). Ce modèle conceptuel représente les systèmes sur deux niveaux, les compartiments par des aires délimitées et les cinèses intrasystémiques (seules figurées ici) par des flèches.

Vis-à-vis du référendaire composition, le système peut comporter deux ou n compartiments (2 par exemple un individu et son milieu) perçus pour les échanges (cinèses) d'éléments complexes. Suivant le référendaire espace, on peut décrire des échanges entre deux portions d'espace de l'écosphère.

Les trois référendaires sont indubitablement, liés (fig. 1-12, p. 99) : un échange implique du temps, se fait dans l'espace et porte sur des éléments analytiques de la composition. La modélisation moderne peut réduire le système en faisant abstraction de tout élément de la composition sauf un (e.g. l'azote de la fig. 2-13, p. 150, qui est lié à la structure des compartiments et la nature des cinèses), ne retenir qu'un temps uniforme (ou une durée tendant à l'instantané), et faire abstraction de l'espace partiellement (cf. notion de pieu, p. 131) ou complètement (notion de point, p. 287).

Il est essentiel de souligner qu'opérativement, c'est-à-dire de façon scientifiquement réfutable, l'intégration d'un système (en tant que compartiment) dans son sursystème ou inversement l'analyse du sous-système considéré comme compartiment d'un système implique une connexité systémique. C'est-à-dire qu'il y a emboîtement dans la hiérarchie systémique que celle-ci fût structurée par rapport à l'espace ou/et le temps ou/et la composition. C'est dire aussi qu'il y a échanges entre les composants connexes des systèmes.

S'il y a nécessairement connexité de proche en proche entre les systèmes réels de l'écosphère, il y a souvent disjonction des informations que nous avons sur ces systèmes. Il ne suffit pas lors de synthèses à partir de la globalité d'évoquer les systèmes dont sont issues les données, il faut disposer d'information permettant une représentation cohérente de ceux-ci en tant que système... ; ce qui est rare mais peut être optimisé (cf. 2ème partie). Il est donc préférable d'appeler objet celui considéré "de

l'extérieur" comme tel, et systèmes ceux regardés comme ensembles de composants connexes.

Un compartiment est expliqué par son élude intrinsèque en tant que système et un système explique un état d'un compartiment du sursystème où il s'inscrit.

11 est possible d'étudier un système complexe ayant plusieurs niveaux notamment pour les études comparatives, mais il faut impérativement, pour les études systémiques, que chaque niveau successif soit connectable systomon par systomon. Ce qui est extérieur au système étudié est l'entour (p. 32).

L'étude opérationnelle d'un système fonctionnel (ou systémon) se fera donc tôt ou tard par la globalyse du système réel, impliquant des options sur les données (élément de l'ensemble étudié = élément du système) d'un système lui-même sélectionné. Ces données seront acquises par rapport à un référentiel (p. 296) et gérées (p. 312) avant, d'être étudiées pour leur organisation fonctionnelle (modèle "mathématique" ou infosystème élémentaire). Dans le système écologique général (l'écosphère) le choix, dans ce réel d'un systémon perçu par son analyse, sera représenté synthétiquement par un infosystème élémentaire (p. 401).

1.7.3. Les hiérarchies opérationnelles

ALLEN et STARR (1982) ont attiré l'attention sur l'importance de l'organisation hiérarchique des systémons dans la complexité écologique ; leurs exemples sont nombreux et divers. Malheureusement, faute d'un usage rigoureux du concept écologie et en raison de l'acceptation de nombreuses approximations (on y retrouve le dogme néguentropie = information, quatre ans après sa réfutation), leur approche ne conduit pas à une démarche opérationnelle.

De ce point de vue les hiérarchies peuvent recouvrir des réalités très différentes, car elles peuvent être constituées indépendamment des systèmes écologiques. C'est notamment le cas des classifications taxinomiques et taxonomiques qui visent avant tout à créer des hiérarchies, utiles évidemment, mais sans objectif systémique.

Il faut donc opposer pour les distinguer

Pies hiérarchies systémiques : emboîtements de systémons qui permettent, en considérant chaque systémon tour à tour, d'effectuer une observation de deux niveaux, l'analyse, la synthèse, la validation et, à condition de ne pas sauter de niveaux systémiques (= connexité hiérarchique systémique), permettent de décrire des systèmes complexes, particulièrement en infosystèmes qui intègrent par étape sursystèmes, systèmes, sous-systèmes, etc... (fig. 1-3, p. 40 et 1-10, p. 93). A chaque niveau, le tout n'est pas la simple somme des parties, il incorpore les relations entre ces parties (= composants) dans le cadre d'un systémon (deux niveaux) fonctionnellement cohérent. Toute tentative de franchissement, sans preuve, d'un niveau (ex : du niveau n pour interpréter n + 2) n'est pas opérationnelle, et ne peut être que spéculative et ne produire qu'un discours sur la nature interdisant tout contrôle et toute validation,

2) les hiérarchies cumulables : ce sont des hiérarchies dont un tout est constitué de la somme des parties (exemple, un genre en taxonomie est constitué de la somme des espèces ; exemple : une dichotomie automatique des caractéristiques de milieux, obtenue par classification automatique d'ordre deux, ROUX, 1985).

Les hiérarchies cumulables permettent de repérer des éléments par ensembles systématiquement ordonnés ; elles sont les moyens d'ordonner les systèmes écologiques pris-comme-objets par comparaison typologique (p. 367). En complément, les hiérarchies systémiques permettent de situer et d'articuler les études systémon par systémon. Au plan opérationnel, chaque étude systémique, doit fixer initialement

les limites du système étudié, s'y tenir pour en décrire le modèle, le valider avant de le transposer ou le connecter à une autre étude.

Ces deux hiérarchisations opérationnelles suffiront au cadre de l'ouvrage qui donnera priorité à l'élaboration des connaissances (2ème partie) en excluant les discussions sémentico-conceptuello-théoriques qui résultent du refus du sens initial de termes élémentaires comme écologie, écosystème, etc. (c/. pour comparaison O'NEILL *et al.*, 1986) et de la confusion entre hiérarchies cumulables non écosystémiques (tels individu, population, peuplement, biocénose) et hiérarchies systémiques (système, syntégon, subécosystème, holocénose, écorne, écosphère) (p. 191).

1.7.4. L'information sur les systèmes écologiques

L'écosphère a une structure biophysicochimique où les éléments se déplacent sous l'action de forces. Ces forces entraînent la "dégradation" de l'énergie et jouent un rôle de moteur, selon le deuxième principe de la thermodynamique (p. 64). Enfin, les diverses réactions physicochimiques, nécessairement successives dans l'espace-temps, s'enchaînent et se recombinaient.

La connaissance que nous avons de certains processus nous permet "infailliblement" de prévoir que $\text{HCl} + (1) \text{NaOH} \rightarrow (2) \text{NaCl} + 2\text{H}_2\text{O}$. Cette information est un état antérieur HCl, NaOH puis une cinèse de (1) qui permet une prédiction de l'état postérieur (2) = NaCl et H_2O en mélange.

Tout événement serait ainsi prédictible si toutes les composantes de l'état antérieur étaient connues ; si l'information totale sur l'état de tout le système antérieur était établi, il n'y aurait pas d'aléatoire au niveau écologique.

En pratique, nous ne pouvons étudier qu'une fraction infime de la composition dans l'espace-temps écologique, mais plus nous avons d'informations sur celui-ci au temps t_1 plus nous augmentons notre pouvoir de prédiction aux temps t_2 , t_3 , ... t_n . Plus nous connaissons la situation aux points S_1 , S_2 , ..., S_n , plus nous pouvons prédire aux points s_1 , ..., s_n . Augmenter cette information, gérer celle-ci, prend pratiquement deux directions :

1) nous augmentons la portion étudiée de l'espace-temps, englobant ainsi dans l'information du système ce qui n'aurait été que des aléas incontrôlés, car spatiotemporellement extérieurs sans cette augmentation;

2) nous approfondissons l'analyse de la composition avec un choix systématiquement cohérent, c'est-à-dire nous accroissons l'information sur un système (les détails de celui-ci).

En d'autres termes, une étude écologique peut être généralisée ou approfondie. Dans ces deux cas, nous augmentons la quantité d'informations prises en compte donc la prédictibilité (l'information croît tandis que les aléas de la prédiction décroissent par une incorporation croissante de faits aux modèles décrits et expliqués : modélisation par connexions (p. 392) et hiérarchie systémique.

Les états antérieurs "totalement" connus impliquent la possibilité de prédire leurs états postérieurs à partir de l'information qu'ils contiennent.

Les organismes constituent à cet égard des caractéristiques privilégiées. Dans l'ensemble physicochimique, ils sont en effet des répétitions dans l'espace et le temps de "pratiquement" la même chose : les individus d'une population (d'une espèce) varient peu entre eux à la même écophase (p. 212) et beaucoup de leurs propriétés sont identiques : ils résultent d'une, reproduction. Dans le champ écologique cette propriété est importante.

1) Elle implique que ces individus contiennent une information quasi semblable permettant leur comparaison vis-à-vis d'un modèle quasi unique.

2) Elle implique que les entrées-sorties de leur système avec leur milieu soient suffisamment assurées pour la maintenance de leur activité initiale : le milieu d'un organisme agit sur - et est modifié par - un organisme. Il y a nécessairement cohérence fonctionnelle, donc ni orphobonctionnelle, entre un organisme et son milieu.

3) Cette connexité implique en conséquence que le maintien d'une population décrit une part non négligeable du milieu de cette population.

4) Véritable point de repère de la maintenance à l'identique de systèmes ouverts dans le champ écologique, riche en information très complexe, un organisme et un bio-indicateur identifiable. Les individus identiques (au sens de l'identification taxonomique) ont des propriétés relativement similaires alors que la partie physicochimique abiotique se présente comme un continuum à hétérogénéité variable sans individualisations précises. Ceci a des conséquences méthodologiques valorisées notamment par l'intrapolation ponctuelle (p. 287).

L'identifiabilité, toujours relative (p. 256, 374) peut toutefois aussi bien porter sur des systèmes écologiques que sur les seuls sous-systèmes biologiques.

Par contre, l'idée de réduire les systèmes écologiques à des systèmes cybernétiques d'échange de messages est très présente dans de nombreuses constructions théoriques (c/. ALLEN et STARR, 1982). Elle conduit à des supputations non réfutables car il y a fondamentalement impossibilité de caractériser la nature et la valeur du message ; l'analogie entre ces deux types de systèmes n'est pas homologie (p. 88).

1. 7.5. Caractéristiques écologiques et études systémiques opérationnelles

Quel que soit le système étudié en écologie, l'information utile (p. 88) est celle des DICs donnant les valeurs objectives observées des caractéristiques (p. 43) écologiques. Par rapport au système étudié celles-ci sont de plusieurs natures à un "quasi-instant" donné

1) Elles se rapportent au système lui-même et décrivent les propriétés d'état et de cinèse. Elles sont issues, en fonction du temps, de l'état antérieur du système lui-même et sont en quelque sorte "innées" : ce sont les innéats. Par exemple, la structure d'un sol, les aptitudes d'une enzyme ou le codage génétique du génome (si ceux-ci appartiennent au système étudié).

2) Elles se rapportent à l'entour du système écologique (elles proviennent du sur-système) et sont donc initialement externes à ce système en agissant toutefois sur lui, ce sont les mésoneats (de méso = milieu, par exemple, une érosion éolienne ou une pluie sur un sol, une température ou une richesse en ammoniacque ambiantes, ...).

3) Elles proviennent du domaine socio-économique et agissent sur le système : ce sont les actes (p. 28, 272).

4) Mésoneats et actes constituent les variables externes du système ou exnéats agissant sur celui-ci.

5) Enfin le système engendre pour l'instant "juste-suivant" des générateurs. On peut, vis-à-vis de leur destinée, au pas de temps suivant en termes de système considérer les générateurs précédents comme des innéats (1-générateurs) des sorties (exnéats) dans le milieu (M-générateurs) ou vers le domaine socio-économique (actes) (A-générateurs) (fig. 1-11).

Exnéats et innéats engendrent, via le système, les générateurs.

Il est à noter que les I-générateurs seront au temps suivant ($t + 1$) les innéats issus du système au temps t . On parle de rétroaction lorsque le système agit ainsi sur lui-même, généralement en fonction du temps.

Par exemple, au niveau de l'écosphère, les innéats sont ses propriétés, les mésoneats les échanges cosmiques (tels les rayonnements, ...) ou géodynamiques (tectoniques, volcanisme, géothermie, ...), les actes, les diverses activités humaines. Actes et mésoneats sont des caractéristiques externes au système "écosphère".

L'écosphère est un système ouvert subissant les influences externes astronomiques, géologiques ou anthropiques et caractérisé par la présence, exclusivement à son niveau, des êtres vivants qui modifient en retour les éléments externes par leurs émanations (dépôts de roches calcaires, modification de l'atmosphère, etc.). Sa structure comporte alternativement et de façon étroitement

intriquée une matrice physicochimique abiotique et des éléments biologiques, sous forme de métabolons ayant des régulations propres, en partie autonomes. S'il est possible dans un premier temps de privilégier les approches ou statiques, ou cinétiques, ou morphofonctionnelles, voire transformistes (p. 46) seule opérationnellement sa connexion systémique est efficace à terme (p. 408).

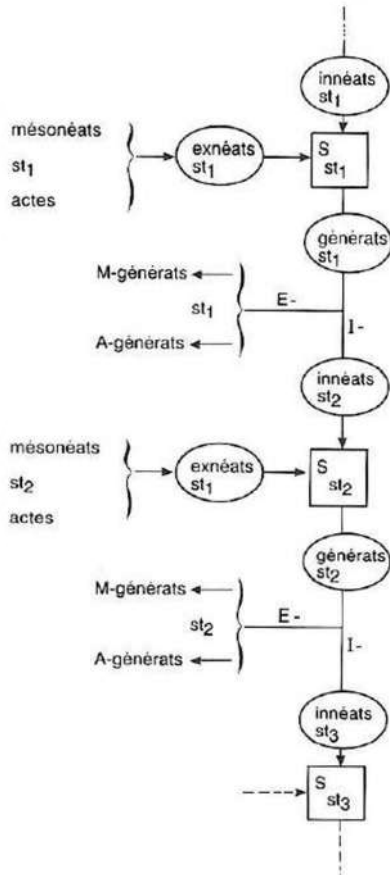


Figure 1-11 - Relations cinétiques temporo-spatiales d'un système à son entour. Un système S reçoit dans sa position temporo-spatiale st_j des innéats (son état), de l'instant st_0 antérieur, et des cinèses entrantes (exnéats spontanés de son entour = mésoneats et actes socio-économiques). Il produit des généraits c'est-à-dire son état ζ -généat st_j et des sorties ζ -généat vers l'entour (M-généat) et le système socio-économique (A-généat). De même aux pas d'espace-temps suivants (st_2 , st_j , ...).

L'écologie ne peut opérationnellement aborder la systémique que systémor) par systémor, localement et à partir de caractéristiques en nombre limité, dans un temps lui-même restreint. 11 ne peut avoir du champ écologique que les données de la globalyse qu'il peut par contre organiser, réorganiser en modèles de systèmes élémentaires (système) puis par une connexion de modèles décrire des systèmes plus complexes (hiérarchie ascendante dans le temps, l'espace et les niveaux d'observations). Il tend à une représentation plus large, plus globale, plus complète qui doit être validée à chaque nouvelle étape et peut, à tout instant, être réfutée.

Les études écologiques systémiques portent sur les systèmes concrets, les systèmes écologiques et utilisent comme représentation des infosystèmes (p. 401) qui miment, à partir de l'information que l'on en a, les systèmes concrets par des

infosystèmes mathématisés permettant à la fois l'analyse de la structure perçue du système et des simulations pour validation (analyse et simulation au sens de HALL et Day, 1977). En général, on considère en modélisation un compartiment, ses entrées et sorties ("input" et "output"). De ce fait, l'usage a conduit à prendre en compte les intrants et extrants comme équivalent français (SIMON, 1986) tant sur les modèles que sur les systèmes concrets, ... par exemple, dans ces derniers les agronomes tendent à regrouper sous le vocable intrant les différents coûts agissant sur une parcelle (et non toutes les entrées, comme la pluie par exemple). En définitive, intrant ("input") et extrant ("output") désignent tout ou partie respectivement des entrées et sorties soit en considérant un système concret soit son mime (modèle). Ce qui est à la fois très souple et imprécis. Les néologismes innéats, exnéats, mésonéats et généraux traduisent de façon univoque, et d'après les racines, les éléments existant (ou perçus : globalyse) d'un système à un instant donné depuis leur origine en entrée ou sortie du système réel. Parmi les exnéats, les mésonéats sont issus du sursystème écologique tandis que les actes dépendent des choix socio-économiques.

1.7.6. Formalisation de l'écologie opérationnelle

Tout au long de ce chapitre un certain nombre de concepts fondamentaux ont été présentés ; toutefois, après cette partie générale, certains devront être plus formellement définis.

La définition de l'écologie a été donnée d'emblée et ses propriétés analysées (p. 20).

Les systèmes sont des ensembles d'éléments, matériels ou non, dépendant les uns des autres et constituant un tout organisé (système nerveux, système de classification, système formel, ...) par des échanges (cinèses) entre compartiments ces derniers décrits par des états.

Un système écologique se rapportant par définition à l'étude des relations des organismes dans leur milieu a trait à tout ou partie de l'objet d'étude de l'écologie (l'écosphère) de façon à constituer un tout organisé. Il ne peut porter sur un organisme isolément (plus de relations avec son milieu). Le système écologique est donc un système concret biophysicochimique.

L'écologie opérationnelle sera donc simplement le domaine de l'écologie qui porte concrètement sur les parties étudiables de l'écosphère en respectant les exigences de la définition de l'écologie et notamment la réfutabilité scientifique. Elle exclut l'écologie spéculative c'est-à-dire les constructions hypothétiques invérifiables dans un avenir proche, les interprétations opportunistes et les tautologies (p. 42).

L'écologie opérationnelle vise donc explicitement à un développement rigoureux, sur des bases réfutables, des connaissances vis-à-vis des systèmes écologiques.

La "théorie des systèmes" a produit de nombreuses formulations qui peuvent constituer au moment de chaque application particulière des outils intéressants. Son langage n'est malheureusement pas homogène selon les points de vues adoptés, en automatique, cybernétique, écologie, informatique, mathématique (matricielle, vectorielle, ...).

Par exemple, on peut adopter des états initiaux connus ou inconnus. En écologie opérationnelle, ceux-ci sont nécessairement connus et ne peuvent être que perçus d'un niveau systémique supérieur.

On parle de rétroaction lorsque le compartiment agit sur lui-même ; il s'agit ici encore d'une représentation particulière faisant abstraction de l'espace-Lemps qui nécessairement sépare les deux états du compartiment agissant sur "lui-même". Or en informatique, cybernétique ou automatique, la rétroaction agit sur le fonctionnement, en écologie l'espace-temps traduit des changements de cinèses (fonctions) mais aussi d'état.

On parle aussi d'interactions entre compartiments... il s'agit en écologie nécessairement d'échanges (donc de cinèses matérielles entre compartiments). On

parle également de variables invariantes (constantes) ou variantes... qui ne dépendent que de l'espace-temps considéré, aucun compartiment ne pouvant être écologiquement invariant.

Enfin, certains modèles ne prennent en compte que les variables d'état de compartiments afin de décrire l'évolution spatiotemporelle d'un "système" réduit en fait à un compartiment. Cette attitude, typologiquement logique, revient à ne pas prendre en compte les vrais systèmes car par définition il y a nécessairement cinèses entre compartiments du système. On peut évidemment prendre les compartiments de façon dissociée, et même les classer en hiérarchies cumulatives (somme des individus d'un taxon, des éléments chimiques d'un sol, hiérarchie taxonomique, ...), mais il ne s'agit pas de systémique mais de comparaison. On peut avoir un modèle, descriptif d'un compartiment ou de nombreux compartiments déconnectés : ce modèle ne décrit pas un système (p. 401).

En fait, la systémique permet la prise en compte de la composition des systèmes de façon élémentaire (système) ou plus complexe, par connexion de systèmes connectés en fonction du temps et de l'espace. En respectant simultanément la notion de système et celle des trois référendaires (p. 37) la représentation systémique devient homogène (fig. 1-2, p. 36). Usuellement, on ne représente ces systèmes que vis-à-vis de deux référendaires en des modèles négligeant le troisième. Ces modèles, qui ne sont pas les systèmes (concrets) mais leur représentation mimée (conceptuel, matériel ou mathématique, p. 398) peuvent être écologiques (complet : fig. 1-12), transformistes ou "dynamiques" (composition-temps), chorologiques (composition dans un espace et temps limité), structurels ou "à compartiments" (composition-espace).

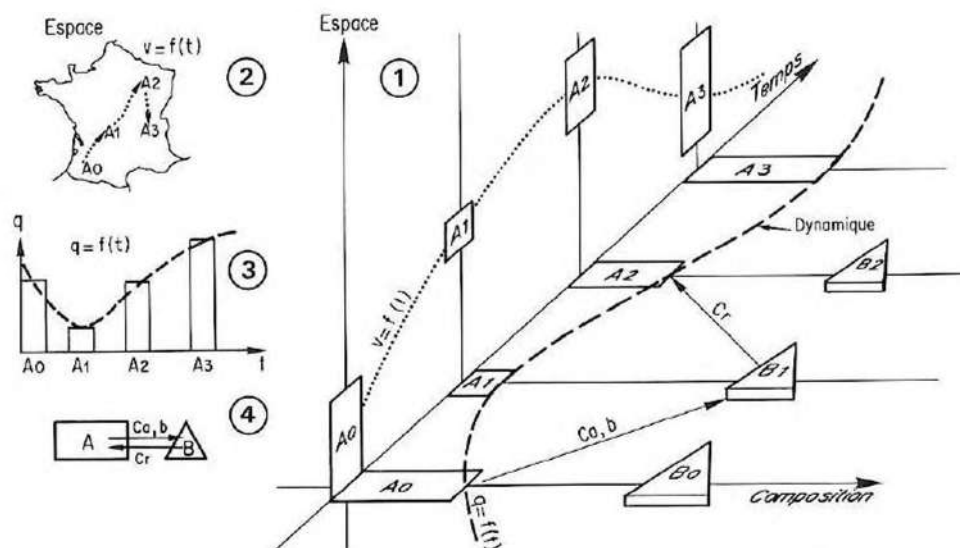


Figure 1-12.- Représentations (modèles) des systèmes écologiques selon les trois référendaires. 1) Modèle écologique à 2 compartiments A et B dans les espaces-temps st_1 , st_2 > ■■■ st_2 2) Modèle chorologique de A. 3) Modèle dynamique des transformations de la variable A. 4) Modèle à compartiments des états A et B et cinèses $C'a,b$ et Cb,a , cette dernière étant la rétroaction (Cr de Ca,b dans le système (les cinèses, omniprésentes, ne sont figurées qu'en $iq - tj$ (Ca,b) et $tj - t\%$ (Cr) sur le schéma 1.

Pour plus d'information sur ces diverses approches systémiques ou pseudo-systémiques on pourra consulter VON BERTALANFFY (1968)), CANCELA Da FONSECA (1967, 1974), PATTEN (1971, 1972), (p. 390).

Nous verrons en deuxième partie (cf. p. 296, 321, 357 notamment) que l'adoption systématique du référentiel des données, de la gestion relationnelle et de l'interprétation intégrée par Intelligence Artificielle répond dès à présent à la demande d'une << écologie théorique qui devra être renforcée pour comprendre comment aborder le problème de la comparabilité et de l'extrapolabilité des résultats lorsque l'on passe d'une échelle à l'autre, et comment introduire le facteur "temps" pour améliorer le pouvoir prédictif qui est la condition sine qua non en tant que science >> (Di CASTRI, 1985). Il ne s'agit plus d'un problème théorique mais exclusivement de limitations opérationnelles.

La solution de ce problème global de l'écologie théorique réside dans la continuité opérationnelle où les trois référentiels des systèmes écologiques (= le réel) sont transposés dans la globalyse (les DICs), la gestion des données (BDR) et finalement les infosystèmes validés sur le réel. Les pratiques classiques à deux référentiels posent des problèmes théoriques, qui ne sont en fait qu'artefacts, résultant de l'usage de modèles "importés" depuis les sciences de l'ingénieur, mais inadéquats à l'écologie. La structure temporospatiale des modèles écologiques doit se modifier en cours de simulation du fait de celle-ci et non refléter une mécanique fixe, comme en automatique, en informatique où l'on ne connaît que deux états (panne, marche).

La connaissance que nous avons des systèmes écologiques est fondée sur les DICs, données objectives car issues directement de l'objet d'étude. Ces données résultent opérationnellement d'options ayant sélectionné l'acquisition de telle ou telle donnée. Parmi le nombre infiniment grand des données qui auraient pu être acquises, les DICs ne représentent qu'un échantillon des données objectives qui caractériseraient en totalité les systèmes.

A partir de l'ensemble des DICs de la globalyse l'effort de synthèse conduira entre autres à un modèle portant sur ces informations (infosystème) qui tendra à représenter le système écologique considéré à partir des faits (DICs) mais en introduisant explicitement des propositions (= hypothèses liées à la synthèse). Ces ISTECS (Infosystèmes SpatioTemporels Ecologiques à Compartiments) constituent la formalisation de nos connaissances écologiques et peuvent à tout instant être optimisés par une meilleure validation au système réel. Cette validation (écovalidation, p. 417) implique un (des) prédicat(s) réfutable(s), puis vérifié(s) dans les systèmes écologiques grâce à de nouvelles DICs.

La formalisation écologique implique que l'écologie utilise une théorie naïve, c'est-à-dire une certaine série de concepts primitifs, qui sont ceux liés aux données physiques, chimiques et biologiques des systèmes écologiques et des actes (p. 272) et une série de relations primitives qui sont celles du référentiel écologique opérationnel. On peut alors combiner concepts et relations primitifs (au sens d'élémentaires) pour aboutir à des concepts plus complexes. Toute une combinaison est possible en changeant de système (p. 91) dans les systèmes écologiques et en connectant les ISTECS correspondants (voir p. 403).

La formalisation est en écologie opérationnelle obligatoire, car formaliser c'est préciser un modèle conceptuel, par nature toujours provisoire et c'est l'étayer de données objectives (DICs) pour aboutir logiquement à un ISTECS réfutable qui, même s'il s'avère faux (inadéquat à la représentation du système écologique étudié), améliore la compréhension des DICs ou oblige à des options plus pertinentes pour éliminer les propositions erronées.

La formalisation a pour objet un ensemble de propositions issues de la globalyse et traduite en langage théorique. Les propositions formelles sont alors usuellement isomorphes avec une structure mathématique déjà connue. C'est-à-dire que, partant de la théorie naïve, elle aboutit à une "mathématisation" c'est-à-dire à

un calcul formel. L'interprétation finale exprime les formes et formules du langage formel dans le langage de la théorie naïve. La formalisation, permettant la confrontation du naïf au formel, permet :

- 1) de vérifier la cohérence des concepts de la théorie naïve,
- 2) de rectifier les interprétations par une meilleure conceptualisation des DICs, de meilleures options (plan d'échantillonnage) et propositions,
- 3) de confronter des théories naïves concurrentes portant sur un même système.

La formalisation joue donc un rôle clé pour l'élaboration scientifique de l'écologie (2ème partie) en optimisant la qualité des options lors de l'acquisition des données objectives (DICs, chap. IV) lors de la prise en compte des connaissances (chap. V) et lors des interprétations (chap. VI) dont les propositions sont confrontables aux systèmes écologiques. Elle permet une approche systémique de l'écologie ce qui, entre autres conséquences, permet l'intégration des interprétations et connaissances (chap. VII) et lève les dualismes opposant des situations opérationnelles (faussement) réputées insolubles (p. 455).

1.7.7. Connaissances et intelligence du domaine écologique

Nous venons de voir au paragraphe précédent la formalisation des données, concepts et relations du "noyau dur" de l'écologie. En pratique l'approche d'une telle formalisation et son insertion sociale n'est pas réduite à ces seules opérations. Tout un domaine de la connaissance - au sens des faits évoqués en liaison avec tous discours sur notre environnement ou notre écosphère - ne relève pas de la démarche scientifique rigoureuse, ni de la maîtrise technique optimale, mais d'une série d'opinions empiriques, pas nécessairement fausses mais fondées sur des croyances, des assertions, des sentiments définis ou confus.

Ce domaine subjectif de la connaissance ne saurait être écarté, car il est à la fois le lien entre la société et le "noyau dur" d'une démarche écologique rigoureuse incluant la pratique normale des hypothèses (options et propositions confondues) du domaine de l'interprétation écologique. C'est le domaine des choix heureux ou malheureux, tant des hypothèses relatives aux études à conduire, que des conclusions de telles études. C'est le domaine où s'exprime l'intelligence que nous avons de l'écologie, autrement dit de notre compréhension des objets d'étude proximaux à l'homme dans son environnement : ceux de l'écosphère.

Cette intelligence est au niveau de l'individu, aussi éminent soit-il, extrêmement réduite en raison du pouvoir humain limité de perception de l'objet d'étude (bases objectives) et de l'aptitude à la synthèse (interprétation) de chacun.

Il faut ici souligner - cela ne sera jamais assez fait - l'impuissance de l'homme à comprendre individuellement son environnement, et corrélativement son inaptitude congénitale à agir sciemment sur celui-ci de façon intelligente.

Les efforts de synthèse visent justement à généraliser des résultats particuliers, i.e. à effectuer des inférences. Mais usuellement ce qui est gagné en surface est perdu en profondeur ; ce qui est gagné en vision holistique est perdu en fiabilité.

D'où un double malaise, parfois présenté en termes conflictuels de deux situations également insatisfaisantes : ou bien des recherches spécialisées approfondies mais de portée limitée, ou bien des généralisations d'opinions amalgamant des faits disparates et peu, ou non, réfutables. D'où des applications techniques d'une efficacité locale d'autant plus redoutable qu'elle s'inscrit dans (incompréhension des conséquences générales.

Le fait nouveau se nomme Intelligence Artificielle (ou IA) : il s'agit, d'une mise en commun effective, opérationnelle (quelle que soit leur validité scientifique) des connaissances que nous avons de l'écosphère.

11 est inopportun dans ce chapitre des "Notions générales" de détailler le contenu de cette forme d'intelligence de notre environnement, mais il faut dès à présent en décrire l'enjeu qui dicte les choix rédactionnels des chapitres ultérieurs.

Cette Intelligence Artificielle est un moyen direct pour tout individu détenant quelques bribes de connaissance sur l'écosphère, de le faire savoir de façon explicite (avec l'aide d'un cognéticien). Cette connaissance peut être de la simple croyance, exprimable en opinions d'expert, ou le résultat d'une inférence fondée statistiquement par une étude d'ajustement "hautement probable" de données objectives (DIGs) - ou toutes situations intermédiaires, par exemple l'expérience longuement vécue d'un bon professionnel, la perception floue d'une réalité peu documentée par des faits, des faits eux-mêmes douteux ou très objectifs, etc. Il s'agit de le faire savoir par un moyen d'organisation et de transmission électronique rapide, de plus en plus efficace permettant la mise à disposition pour tous de ce savoir.

Les moyens de l'I.A. sont en pleine évolution et leurs performances sont très rapidement croissantes. Cet ouvrage ne porte pas spécifiquement sur ceux-ci ; de nombreux ouvrages, d'ailleurs rapidement obsolètes, y sont consacrés. Ce livre porte par contre sur la position de l'écologue face à ces moyens nouveaux et sur la nécessaire ré-évaluation de ses pratiques qu'ils entraînent.

Parlons de l'intelligence du spécialiste et. celle de l'I.A. d'abord. Un système d'I.A. ne peut contenir que ce qui y a été mis - outre les difficultés techniques, en rapide réduction - il y a les limites de l'exposé effectué par le spécialiste (dénommé expert). Il y a un non-dit, des oublis qui font percevoir du point de vue du spécialiste individuellement le contenu de la Base de Connaissances qui le reflète comme une "sous-intelligence". Mais la BdC peut être complétée pour les oublis ; mieux son système informatique (Système-Expert) comporte aujourd'hui une méthode pour les réduire initialement... de sorte que peu à peu la BdC oublie moins souvent que l'expert. Mais la BdC peut et doit dépasser le seul domaine d'un expert ou d'une équipe d'experts pour intégrer des connaissances d'autres spécialistes. Tout en conservant la profondeur de la spécialisation, elle acquiert la surface de la synthèse. L'objectif d'un abord global et collégial de notre écosphère n'est plus hors de portée, même si techniquement il ne peut être matériellement réalisé dès aujourd'hui : révolution des techniques sera plus rapide que l'expression des expertises.

En informatique, le vaste domaine de l'I.A. recouvre tout ce qui n'est pas pris en charge par les algorithmes. Les algorithmes sont une < <description du schéma de réalisation d'un événement à l'aide d'un répertoire fini d'actions élémentaires nommées, réalisables a priori et à durée limitée dans le temps>> (MORVAN, 1986). L'I.A. fait appel à des heuristiques qui à l'inverse sont des < <techniques de résolution de problèmes qui tiennent compte à chaque pas des résultats précédents et en déduit la stratégie à adopter par la suite>> (MORVAN, 1986). L'I.A. a balbutié et quelque peu déçu avec les moyens de l'informatique classique (p. 309) ; aujourd'hui elle remplit un rôle très rapidement croissant en informatique moderne.

D'une façon générale, les logiciels de l'I.A. s'appuient sur des concepts clairs et une sémantique rigoureuse et pertinente : ils sont issus d'une rencontre entre linguistes, logiciens et informaticiens. Par contre, les écologues sont encore aujourd'hui un amalgame de spécialistes venant de disciplines variées et ayant des niveaux d'intelligence de leurs domaines respectifs très hétéroclites. Chaque secteur a forgé un langage propre, parfois localement rigoureux, mais nullement partagé. La communication entre ces spécialistes a pu se faire approximativement par un langage flou et polysémique. En permettant l'unicité de l'écologie, l'I.A. exclut ces artifices pré-informatiques ayant survécu à l'informatique classique.

Ceci oblige à une ré-évaluation que je tente, assurément insuffisamment dans cet ouvrage, à partir de notre propre expérience. Cette ré-évaluation peut se faire selon trois processus d'intégration simultanés et conjoints.

Le premier processus a trait à l'objet même de l'écologie : les systèmes écologiques de l'écosphère. L'approche écologique ne peut être que systémique et les écologues, en tant que spécialistes, contribuent à l'étude d'une partie de ces systèmes. Un essai de présentation de ces systèmes est donc fait chapitre II. Les composants biologiques ne sont pas nécessairement dominants au plan des systèmes écologiques, mais ont souvent été étudiées de façon privilégiée hors système ce qui crée une distorsion de perception par rapport aux systèmes réels. Réciproquement une connaissance minimale des références biologiques, et de leurs limites est nécessaire et participe aux fondements de l'écologie (chap. III).

Le deuxième processus, abordé en deuxième partie, a trait à l'élaboration de nos connaissances. Il sera décrit selon un plan classique d'acquisition d'informations (chap. IV), de gestion (chap. V) et d'interprétation (chap. VI) pour faciliter l'abord de la situation actuelle d'intégration (chap. VII). Il n'y a pas dans une approche intégrée de différences entre l'énoncé d'une problématique, l'interprétation des résultats et, ce qui a trait aux trois processus, les motivations socio-économiques d'une recherche. L'exposé explicite en I.A. tient simultanément compte des explications sur les faits, incluant les données interprétées selon des règles et conduisant à des commentaires hors système ou à des options de recherche.

Le troisième processus est lié à des relations socio-économiques, justifiant l'existence même de l'écologie, et qui relève des motivations alimentant les réflexions des spécialistes, ou réciproquement celles du public et des acteurs extérieurs, à partir des échanges de point de vue sous forme de commentaires. Cet échange culturel et monétaire entre écologie et relations socio-économiques se traduit sous forme de demandes. Ce dernier processus s'intègre à la démarche d'élaboration de l'écologie (chap. VII) et motive les développements de la discipline (3ème partie).

1.7.8. Position opérationnelle de l'écologue (fig. 1-13)

Au terme de ce premier chapitre, il est indispensable de délimiter le domaine de l'écologue, en tant que tel (il peut évidemment par ailleurs être physicien, biologiste, informaticien, ...). Il est évident que l'écologie intègre les systèmes biophysicochimiques de l'écosphère et a, non seulement culturellement mais aussi techniquement, de forts liens avec les sciences exactes dont elle adapte les connaissances, les techniques et les concepts à son objet, notamment pour la mesure du concret. En outre, la mathématique constitue l'outil logique de l'organisation de ses éléments abstraits (issus des connaissances concrètes : les données). Chaque spécialiste écologue fera donc un usage varié d'un cocktail d'outils, concepts et savoirs empruntés aux disciplines scientifiques connexes - mais tous les écologues sans exception feront appel à un "traitement" de l'information écologique. Selon le degré d'évolution technique, ce traitement pourra être pré-informatique, en référence à l'informatique classique gérant les données en fichiers, ou à l'informatique moderne intégrant dans ses logiciels l'intelligence qui traditionnellement manipule les données sur papier ou fichier informatisé, y compris l'intelligence de manipulations permettant la circulation-réorganisation des données (p. 341).

Comme indiqué au paragraphe précédent cette dernière étape permet à l'écologue, d'agir à la fois en spécialiste assez focalisé pour maîtriser le savoir d'un domaine adéquat à ses aptitudes et simultanément, de participer à l'abord global et scientifique des relations des organismes avec leur milieu. L'informatique classique ou moderne est donc *ipso facto* actuellement l'outil commun à tout écologue. Cette technique n'est pas du ressort des écologues mais de celui des informaticiens : les développements de machines et de puissants logiciels ne sont pas motivés économiquement par l'écologie. Cependant, l'écologie bénéficie de ces développements et l'écologue doit en tirer partie à chaque nouvelle étape. Du point de vue des informaticiens, on distingue un "niveau interne" propre aux machines, langages machine et à l'interfaçage des gros systèmes, puis un niveau conceptuel exprimant logiquement les besoins et entraînant le développement de logiciels spécialisés ou généraux, enfin le niveau externe des utilisateurs.

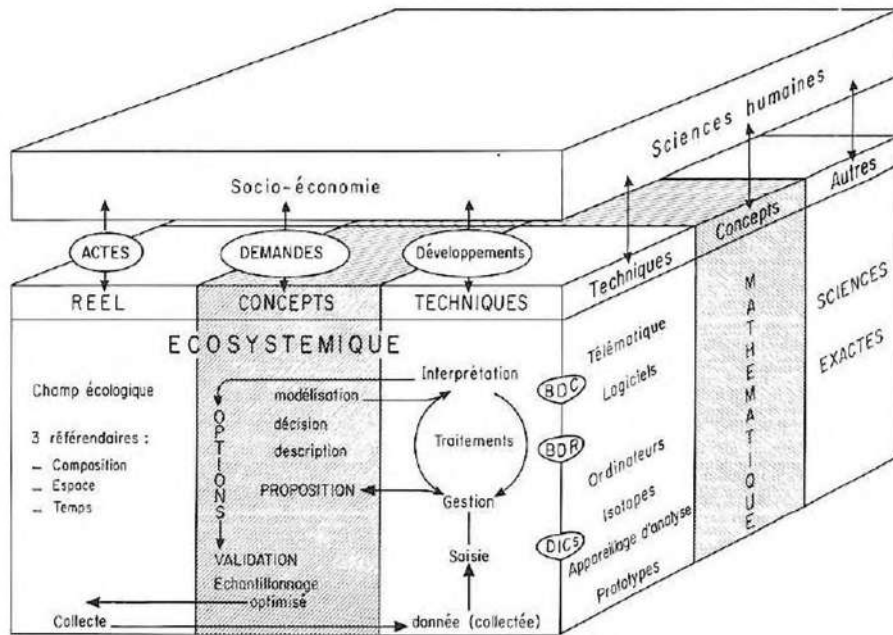


Figure 1-13 - Relations opérationnelles, entre les domaines concrets, conceptuels et techniques de l'écologie, avec les autres sciences exactes et le secteur socio-économique.

Du point de vue des écologues, il y a un niveau concret, l'objet d'étude dans le champ écologique, un niveau conceptuel où il raisonne ses objectifs (tenant compte d'une demande socio-économique) et interprète ses résultats, et un niveau technique où il puise ses outils.

Les autres sciences exactes sont dans une situation équivalente vis-à-vis des développements techniques (dont l'informatique). En outre, ces disciplines ne sont pas indépendantes du contexte social (y compris académique, international, sociologique, économique, politique et culturel), lequel "commande" ou influe les actes humains sur l'écosphère, les demandes auprès des écologues et les développements techniques.

Si toutes les techniques, loin s'en faut, ne se développent pas pour l'écologie, les écologues peuvent puiser et adapter celles-ci et modifier leur choix conceptuels d'hypothèses opérationnelles (options + propositions, p. 41) en vertu de celles-ci. L'approche systémique (réduite au domaine abordable par un écologue), étant cohérente avec l'approche logique sous-tendant les logiciels d'informatique moderne (I.A.), offre le moyen technique d'une optimisation opérationnelle de l'écologie développée dans les chapitres suivants.

L'objet de l'ouvrage porte sur cette relation essentielle de l'écologie Opérationnelle avec l'informatique moderne. 11 ne traite pas de l'informatique, en très rapide évolution, mais de l'indispensable ré-évaluation de l'écologie par les écologues face à cette possibilité, enfin disponible, permettant d'atteindre l'objet de leur science. Cette ré-évaluation se fera surtout dans la 2ème partie dédiée à l'élaboration écologique qui doit se fonder sur l'étude des systèmes écologiques (chap. II) et, dans ceux-ci, des omniprésents sous-systèmes biologiques (chap. III). L'interface socio-

économique, également permanent, est brièvement présentée en 3ème partie dans une perspective de développement de l'écologie.

1.7.9. Ecologie opérationnelle et discriminante : théorie

Le mot théorie a comme premier sens celui de <<connaissance spéculative, idéale, indépendante des faits>> (LAROUSSE, 1964) ou <<spéculation, connaissance qui s'arrête à la simple spéculation sans passer à la pratique>> (LITRE, 1977). L'écologie, comme science opérationnelle du concret, ne peut donc en ce sens avoir de théorie, ou privilégier celle-ci.

Le deuxième sens, celui que nous retiendrons ici, traite de l'<<ensemble des règles, de lois systématiquement organisées, qui servent de base à une science et qui donnent l'explication d'un grand nombre de faits>> (LAROUSSE, 1964) ou du << Rapport établi entre un fait général ou le moindre nombre de faits généraux possibles, et tous les faits particuliers qui en dépendent>> (LITRE, 1977). La théorie écologique ne peut donc qu'avoir trait aux faits écologiques, c'est-à-dire ceux ayant trait au domaine découlant de la définition de l'écologie : l'écosphère.

On peut émettre de nombreuses théories restreintes, souvent spéculatives (au premier sens), mais ce qui nous intéresse ici c'est la théorisation générale.

De ce point de vue, la théorie écologique pourrait s'exprimer succinctement : L'écosphère est un système biophysicochimique, régulé thermodynamiquement. *Le problème n'est pas d'énoncer ce constat mais d'organiser la démarche scientifique pour en permanence valider les connaissances vis-à-vis des systèmes écologiques de cette écosphère à tous les niveaux d'observation, avec connection entre eux et, par rapport aux trois référendaires : l'espace, la composition et le temps. Il s'agit de rendre concret l'écologie opérationnelle.*

Fondamentalement, l'abstraction théorique s'écrit en une ligne et tout en découle logiquement ; le problème est opérationnel.

D'un point de vue opérationnel, cette théorie exprime la nécessité d'être confrontée aux faits (réfutation scientifique) et doit être intégratrice des "faits particuliers" pour notamment permettre une écologie globale, appliquée ou non.

Enfin personne ne peut étudier l'écosphère en tant que système biophysicochimique. Pratiquement, l'écologue-individu ne peut qu'aborder des bribes minuscules de cette écosphère à travers l'optique d'une spécialisation limitante *versus* les trois référendaires écologiques (p. 37) : espace, temps et composition. Ses aptitudes à généraliser les faits qu'il a acquis sont limitées d'où la multiplication des "théories" accessoires, toutes aussi peu efficaces les unes que les autres, car toutes facettes bornées de la théorie qu'elle n'exprime, au mieux, qu'en faits particuliers.

L'incantation théorique, fréquente en "écologie", ne sert souvent qu'à sanctifier sous un habillage mathématique parfois complexe - ou l'absence de lien au réel - ou la référence à une théorie "externe", supposée fondée et susceptible d'asseoir sur une base solide une science qui en aurait fort besoin. Ainsi quand ce ne sont pas le choix d'entités arbitraires (ex : un prédateur et une proie isolés des multiples interférences écosystémiques), ce sont les références à la "théorie de l'information" ou à celle des "systèmes", voir à la théorie des régulations ou cybernétique.

<< Je ne voudrais pas jouer le rôle toujours un peu fâcheux de l'avocat du diable, mais je voudrais simplement dire qu'à mes yeux la théorie des systèmes, la théorie de l'information et dans une large mesure peut-être hélas la morphogénèse ne sont pour l'heure que des vœux pieux>>. Ce jugement décapant de THOM (1975) complété dans le même article par <<...Dans sa cybernétique, Norbert Wiener, avait voulu précisément créer une théorie générale des mécanismes de régulation, théorie qui est plus ou moins restée à l'état de vœu pieux : je ne connais pas un seul théorème de cybernétique>>.

En définitive, l'option de cet ouvrage, délibérément pragmatique n'écarte pas l'approche empirique de synthèse en tant que conséquences des données acquises sur

les systèmes écologiques (rappelons-le sous contraintes des actes humains). Ces synthèses, que l'on peut regarder comme des théories, sont limitées à l'objet étudié et à la qualité relative des faits pris en compte. Outre ces synthèses nous disposons, comme évoqué dans ce chapitre, des lois fondamentales de la matière et de la possibilité d'une approche objective et partielle des systèmes au plan de leurs morphologies et de leurs cinétiques.

Contrairement à ce que l'on ressent devant l'écrasante complexité de l'écosphère environnant l'homme, la priorité n'est pas à une théorie transcendante (souvent évoquée), qui magiquement regrouperait les faits et en constituerait le cadre, mais à l'élaboration objective de connaissances synthétisées par des techniques gérant cette complexité.

Les physiciens de la matière développent de puissantes machines, tels les accélérateurs de particules, pour explorer leur domaine d'étude. Les biologistes moléculaires disposent de procédés analytiques leur permettant sélections et manipulations à l'échelle moléculaire. Les écologues doivent apprendre à se servir des outils permettant de surmonter - sans la nier - la complexité de leur objet d'étude : ceci est devenu possible (2ème partie).

D1 CASTRI et HADLEY (1988) décrivent la frustration, résultant des spécialisations, où chaque écologue opérationnellement se place à l'intérieur de "disciplines" qui n'utilisent, que deux référentiels écologiques (composition vs temps ou espace vs composition), cette situation résulte de l'absence d'un langage écologique commun, pourtant réduit (c/. lexique, p. 564) et de l'acceptation de la situation modeste de chaque intervenant vis-à-vis d'un système écologique concret (fig. 1-13) : la théorie écologique ne peut que refléter son objet d'étude, tout son objet d'étude. Il faut que <<l'écologie continue son évolution en tant que science, en érigeant des barrages (parfois douloureux) contre l'amateurisme, les solutions de facilité, le bavardage vide de contenu ou le dogmatisme doctrinaire qui caractérise une certaine attitude face aux problèmes d'environnement>> (Di CASTRI, 1985).

Il ne s'agit pas de nier la nature de l'écosphère par une imaginaire vision théorique simplificatrice mais d'accepter, de pénétrer pour la connaître, cette énorme complexité. Il ne s'agit pas de nier la nécessité d'une démarche théorique, mais de limiter celle-ci, comme dans toute science exacte dont procède l'écologie, à ce qui est réfutable et d'écarter les démarches spéculatives qui obèrent son développement.

Pour surmonter cela l'écologue a une position (p. 103) lui permettant l'acquisition d'informations (p. 88) sur chaque système (p. 91) hiérarchisables (p. 94) dans les systèmes complexes. (Jette information systémique (p. 95) rapportée à des caractéristiques d'état et cinèse est opérationnelle (p. 96) dans un cadre formalisable (p. 98) qui peut être interprété, jugé, valorisé par l'intelligence Artificielle et plus généralement l'informatique selon des processus de systémique empirique, d'élaboration graduelle des connaissances et d'intégration socio-économique obligeant à une ré-évaluation des acquis écologiques (p. 101) et de la place de l'écologue (p. 103). Pour cela l'écologue doit pratiquer une écologie discriminante (p. 422) en inscrivant ses acquis et interprétations dans une système de l'écosphère et en discriminant son action personnelle dans ce système général ; ce qui ne pose pas de problèmes théoriques spécifiques.

Les connaissances écologiques doivent donc suivre les processus d'élaboration de cette science exacte du complexe, que nous verrons en 2ème partie, mais il est préférable antérieurement de décrire les traits généraux des systèmes écologiques (chapitre 11) incluant les sous-systèmes biologiques (chapitre III) avant d'aborder les conditions du développement fondamental et appliqué (3ème partie) de la discipline.

CHAPITRE DEUXIEME

LES SYSTEMES ECOLOGIQUES

2.1. Notion d'écosystème

TANSLEY (1935) écrit <<Clements' earlier terme "biome" for the whole complexe of organisms inhabiting a given region is unobjectionable, and for some purposes convenient. Rut the more fundamental conception is, at it seems to me, the whole system (in the sense of physics) including not only the organism-complex, but also the whole complex of physical factors forming what we call the environment of the biome - the habitat factors in the widest sense. Though the organisms may claim our primary interest, when we are trying to think fundamentally we cannot separate them from their special environment, with which they form one physical system.

It is the systems so formed which, from the point of view of the ecologist, are the basic units of nature on the face of the earth. Our natural human prejudices force us to consider the organisms (in the sense of the biologist) as the most important parts of these systems, but certainly the inorganic "factors" are also parts - there could be no systems without them, and there is constant interchange of the most various kinds within each system, not only between the organisms but between the organic and the inorganic. These ecosystems, as we may call them, are of the most various kinds and sizes>>.

Et plus loin, il précise :

<<Some systems develop gradually, steadily becoming more highly integrated and more delicately adjusted in equilibrium. The ecosystems are of this kind, and the normal autogenic succession is a progress towards greater integration and stability. The "climax" represents the highest stage of integration and the nearest approach to perfect dynamic equilibrium that can be attained in a system developed under the given conditions and with the available components.

The great regional climatic complexes of the world are important determinants of the primary terrestrial ecosystems, and they contribute parts (components) of the systems, just as do the soils and the organisms. In any fundamental consideration of the ecosystem it is arbitrary and misleading to abstract the climatic factors>>.

Notons la notion centrale de systèmes d'échanges "interchanges", non seulement du point de vue biologique, mais écologique incluant les parties organiques et inorganiques, le sol et le climat et également les notions d'intégration des systèmes où l'écosystème constitue une organisation biophysicochimique où climats, sol et organismes sont considérés comme un système (p. 91). Si le mode rédactionnel de TANSLEY ne conduit pas à une définition aussi formelle que celle donnée par HAECKEL pour l'écologie, notons que le respect du caractère écologique du concept est clair et que la notion de système, par ses compartiments ("parts") et ses Cinèses ("interchanges") est décrite explicitement.

Un écosystème est donc un système d'échange comportant des êtres vivants et des parties abiotiques. Les lois thermodynamiques obligent à un système globalement ouvert dégradant l'énergie ; c'est l'un des modes de description de tels systèmes : à partir d'une entrée énergétique, on suit les divers niveaux de dégradation énergétique et les fractions non dégradées transmises à un autre compartiment.

Mais celle énergie non dégradée est aussi le lien chimique entre les constituants de la matière de sorte que l'on peut s'intéresser au parcours suivi dans les systèmes par les éléments chimiques dans le cadre de leurs diverses associations moléculaires, tissulaires, organiques et inorganiques. Ces éléments peuvent être successivement associés, dissociés, réassociés, en cycles dans un système ou/et, au contraire, acquis puis perdus par l'écosystème local.

Il est heureux que la définition d'écosystème fût systémique 69 ans après celle de l'écologie - elle-même science implicitement systémique (p. 20), restaurée indépendamment par un grand écologue, malgré <<Our natural human prejudices>> pour l'une des notions les plus opérationnelles de l'écologie.

Mais notre penchant naturel, décrit par TANSLEY, nous poussant à privilégier les organismes, nous conduit trop souvent à des distorsions lorsque l'on "pense fondamentalement". Vider l'écosystème (comme l'écologie) de sa dimension abiotique, c'est considérer un circuit transistorisé sans transistor (ou au choix des transistors sans circuit), vie et abios sont en permanence échangeants et interconnectés.

On ne peut nier toutefois l'existence du biocentrisme, cette focalisation quasi exclusive sur les seuls composants biologiques des systèmes. Ceci est si important en "écologie" que d'aucuns considèrent contre toute référence à la définition de la discipline et de l'écosystème, qu'il s'agit d'une "science biologique". Ceci est paradoxal, non seulement par rapport aux définitions de HAECKEL (1866) et TANSLEY (1935), mais par rapport à la nature même des systèmes écologiques.

Quoique portant sur des hémisystèmes (les compartiments abiotiques étant marginalisés) et malgré leurs limites, certaines réflexions écobologiques et leurs nombreux acquis doivent être réincorporés dans les systèmes réels. La difficulté, pour les lecteurs non avertis, est de distinguer les travaux se référant, sous le nom d'écosystème, à des écosystèmes ou à seulement des biocénoses, plus ou moins régulées par des facteurs environnementaux abiotiques. S'écarter de la définition de TANSLEY revient à jargonner dans toutes directions comme l'illustre la discussion de O'NEILL *et al.* (1986), heureusement limitée à la littérature anglo-saxonne.

Les systèmes écologiques sont une intrication intime de vie et d'abios car ils résultent de la différenciation à la surface du globe de sous-systèmes biologiques dans l'ensemble des systèmes écologiques de l'écosphère (p. 72). L'écosphère est le système incluant tous les sous-systèmes étudiés par l'écologue, (les systèmes (p. 91) fonctionnent en dépendant de la disponibilité des éléments (états) dans les compartiments et de la mobilité thermodynamique (cinèses) entre ces compartiments. Leur fonctionnement dépend donc de ses composants qui seront d'abord décrits comme variables d'état avant de considérer les mouvements et blocages (p. 119). De l'ensemble de ces processus, répondant aux forces physiques assurant mouvements et cohérences, résulte une organisation systémique qui sera d'abord décrite à différents niveaux d'observation (p. 133) avant d'être abordée par quelques formalisations usuelles des échanges énergie-matière (p. 156).

L'état actuel de l'écosphère n'est pas apparu *ex nihilo* mais résulte d'une lente évolution qui sera sommairement évoquée au paragraphe 2.6. (p. 177). Les modalités d'études de l'écosphère résultant également de la structure de celle-ci et de la façon dont les disciplines scientifiques se sont historiquement développées, il en résulte à la fois une classification des systèmes écologiques, de différents points de vue, et une classification des sciences et techniques concernées par ces systèmes. Ces modalités d'étude seront décrites au dernier paragraphe (p. 191).

2.2. Constituants majeurs (états)

2.2.1. Introduction à l'écosphère

L'espace incluant les sous-systèmes vivants ayant des relations avec leur milieu est l'écosphère. Les êtres vivants existent dans les sédiments des fosses marines les plus profondes et dans les interstices inaccessibles des gouffres souterrains... les vents les poussent dans l'atmosphère jusqu'aux limites de la stratosphère. Leur abondance varie toutefois considérablement. Elle dépend de la disponibilité locale des éléments nécessaires à leur propre système, d'abord l'eau (ci-dessous) mais aussi des conditions énergétiques permettant la cinèse des réactions chimiques de relations entre les organismes et leur milieu, c'est-à-dire la lumière (p. 111) et la température (p. 113). Les organismes sont intimement mêlés aux supports solides (p. 115) ou fluides (eau, parfois air).

L'écosphère n'est un système fonctionnel que grâce aux mouvements des divers constituants les uns par rapport aux autres, (les mouvements sont associés à ceux des fluides liquides ou gazeux, essentiellement l'eau ou l'air. L'eau assure également le transport de divers solutés et, avec l'air, des suspensions (hydrosols, aérosols) jouent également un rôle prépondérant dans le fonctionnement des systèmes écologiques, notamment, par le recyclage des éléments biogènes (constitutifs des êtres vivants) (p. 116) et de divers contaminants.

Les échanges gazeux, étant souvent globalement non limitants, ce sont les échanges énergétiques (lumière-température) et aqueux qui vont essentiellement constituer les facteurs limitants de la biosphère dans la géosphère.

Les propriétés des constituants de l'écosphère dictent son organisation structurée (p. 118). Le globe est énergétiquement un système ouvert recevant les radiations (lumineuses et thermiques), introduisant cette énergie dans des cycles complexes qui ré-émettent plus ou moins celle-ci. Il assure sa propre production géothermique. L'essentiel des échanges se fait alors au niveau de la surface de la partie commune à la géosphère et à la biosphère dans les parties fluides (liquides et gazeuses) (p. 156). Ces échanges, respectant les principes de la thermodynamique, en sont le moteur physique fonctionnel.

Au contraire le globe est chimiquement un système quasi fermé, il y a très peu d'apports d'éléments chimiques (par les météorites par exemple) et très peu de pertes (par les sondes interplanétaires, par exemple). Si les combinaisons moléculaires des éléments changent beaucoup, l'écosphère globalement a des quantités d'éléments chimiques à peu près constantes et le système est essentiellement organisé en cycles d'éléments fermés (p. 164).

2.2.2. L'eau

Nous avons déjà vu le rôle essentiel joué par l'eau dans l'écosphère (p. 68). Hormis quelques cas extrêmes, où l'eau à l'état gazeux devient très rare (stratosphère) ou loin des conditions vitales (piégée dans des roches de grande profondeur), l'hydrosphère -zone du globe occupée par l'eau- accueille la biosphère (somme des êtres vivants, eux-mêmes systèmes hydrofonctionnels).

Cela tient aux propriétés polaires de l'eau (p. 59) ayant permis la différenciation des sous-systèmes biologiques au sein des systèmes écologiques (p. 74). La chaleur latente élevée qui en résulte fait de l'eau un volant thermique considérable, ce qui n'empêche pas les changements de phase qui au niveau qui prévaut dans l'hydrosphère/écosphère peuvent être solides (zone glacée notamment), liquides (océan, rivières, organismes, ...) ou gazeux (vapeur d'eau atmosphérique).

L'eau en se dissociant en ses éléments devient une source d'éléments d'oxydation-réduction (H^+ , O^{2-}). Elle est à la fois un oxydant et un réducteur. Par sa dissociation partielle (état pH) elle permet à de nombreuses réactions de se développer en son sein

car elle est à la fois un acide, une base et un solvant très important. De plus, elle constitue le cadre de l'exercice des forces de Van der Waals sur les molécules polaires. Par opposition, elle s'expulse des éléments non polaires (hydrophobes = lipophiles) ce qui n'exclut pas qu'elle puisse inclure des substances lipophiles (émulsions), des solides (suspensions) et des gaz dissous.

L'eau liquide, dans laquelle et par laquelle la vie s'est différenciée, joue un rôle essentiel pour celle-ci, en tant que constituant de ses éléments, en tant que fluide des "milieux internes" des êtres vivants, en tant que véhicule de la plupart des éléments entrant et sortant des systèmes vivants enfin, pour nombre d'entre eux, elle est leur milieu vital (plancton marin notamment). Elle est le siège de développements énergétiques très importants (p. 121) au niveau de l'écosphère par un jeu d'interactions gravitationnelles (p. 61) et électromagnétiques (p. 53) et constitue avec les gaz, un fluide majeur permettant les cinèses. Son importance quantitative dans l'écosphère est considérable. On estime à $1\,350 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ l'eau des glaciers, cours d'eau et océans, à $8 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ celle des eaux souterraines et à $13 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ celle de l'atmosphère (essentiellement à l'état de vapeur).

La densité de la matière organique, proche, ou & peine supérieure à un, est globalement voisine de celle de l'eau (= 1) et les réactions délicates de la vie cessent avec la congélation qui, par cristallisation, peut en outre (mais pas toujours) détruire les structures vivantes ou les léser au point de faciliter l'attaque d'organismes complexes par des microorganismes. Les cinétiques chimiques étant liées à la température (p. 57) celles-ci croissent à partir de 0°C .

Chaque organisme est génétiquement conditionné (organisé) pour une gamme de températures variables mais nécessairement adéquates avec celles de son milieu immédiat. La vie en général peut supporter des températures élevées compatibles avec l'eau (c'est-à-dire inférieures au point d'ébullition). Elle peut se développer à forte température auprès des sources hydrothermales en pression élevée, au fond des océans (p. 74). En surface, la température, en accélérant l'évaporation, rend souvent la vie impossible par déshydratation. L'eau joue enfin elle-même un rôle important de volant thermique de sorte que la vie s'est développée nécessairement dans les zones du globe qui ne sont pas en permanence gelées ou durablement sèches ; l'activité biologique dépend de la présence plus ou moins continue de l'eau.

2.2.3. Les gaz : l'air

Les gaz sont constitués de petites molécules qui, aux conditions prévalant sur la surface terrestre (pression de 100 kPa), ont des forces de répulsions (électrons périphériques négatifs) les écartant les unes des autres. L'énergie cinétique de ces molécules indépendantes (se repoussant) est mesurée par la température et croît avec celle-ci. L'eau qui "devrait être" un gaz dans de telles conditions est généralement liquide en raison de son caractère de dipôle (p. 59). Lorsque l'agitation thermique est assez grande, elle est toutefois vaporisée dans l'atmosphère et constitue dans celle-ci une vapeur (humidité relative) qui, pour une température donnée, ne peut être dépassée (saturation). Au-delà les molécules d'eau se rassemblent en gouttelettes qui sous pesanteur tombent en précipitations : pluie, neige, verglas, grêle.

Les gaz sont présents 1) "dans" les pores des solides, importants dans les sols, 2) dissous dans les liquides, dont l'eau, et 3) sur le globe : l'atmosphère.

Très fluides, ils sont le siège de mouvements importants (notamment dus aux écarts thermiques ; dilatations, rétractions) de l'écosphère. Ils tendent verticalement à se stratifier en fonction de leur densité (poids moléculaire), le gaz carbonique étant par exemple plutôt confiné dans et sur le sol et les fluides mais aussi en fonction de leur origine. L'ozone (O_3) se forme dans la stratosphère sous l'effet des radiations solaires ionisantes puis se détruit lentement ; il est donc confiné largement dans la haute atmosphère. L'air comporte essentiellement deux oxydants. L'oxygène (21 % de l'air) déjà présent dans l'eau joue un rôle direct dans les oxydations comme accepteur d'électrons (2 par atome) et est relativement réactif et l'azote (78 % de l'air) est un gaz

2.2.4. Lumière et rayonnements énergétiques

Les radiations sont en partie absorbées dans la très haute atmosphère tels les ultraviolets de moins de 0,18/zm (au dessus de 50 km par N₂ et O₂) de 0,18 à 0,30/zm (pour l'ozone entre 25 et 50 km) tandis que les ultraviolets 0,30-0,34 g.m sont partiellement absorbés par l'ozone, ceux de 0,34 à 0,40/rm atteignent la surface terrestre de même manière que la lumière visible (0,40-0,7Ig-m) et qu'une partie des infrarouges (0,71-3,0Iz.m) dont une autre partie est absorbée dans la troposphère par le gaz carbonique et l'eau. Ces absorptions différentielles conduisent, d'une façon

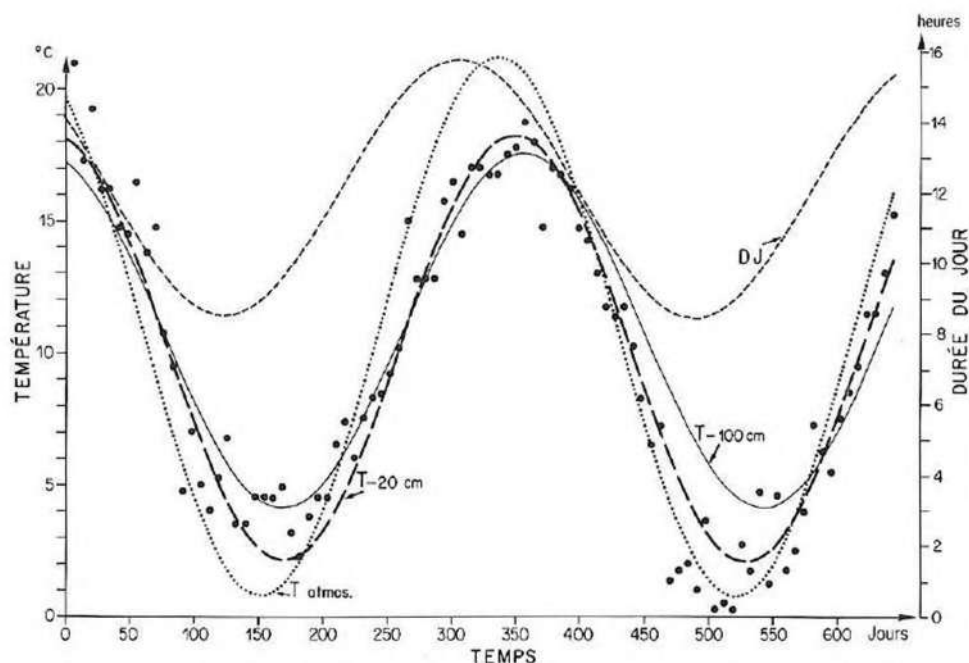


Figure 2-1 - Rythmes saisonniers de la durée du jour (DJ), de la température atmosphérique (sous abri) et dans les strates - 20 cm et - 100 cm du sol (d'après BOUCHE, 1987). Les points sont les valeurs observées à - 20 cm.

générale, à la formation d'atomes libres et d'ions très réactifs, et à un changement d'état thermique.

Les organismes ont souvent développé des mécanismes physiologiques généralement hormonaux, de régulation physiologique, en prévision des phénomènes cycliques saisonniers qui vont venir. Ainsi, la floraison de nombreuses plantes, l'hibernation de mammifères, la saison de reproduction d'oiseaux, la diapause de lombriciens anéciques sont-elles réglées sur la durée du jour (photopériode). Les rythmes d'activité biologique sont ainsi cohérents avec la variation de flux lumineux, la thermicité donc l'hydraulicité et en définitive les possibilités tropho-énergétiques avec les décalages qu'implique la place de chacun dans les chaînes trophiques et les rythmes pluvieux liés à la thermicité régionale, au relief, etc.

La durée du jour (DJ) joue donc un rôle clé en chronobiologie appliquée à l'écologie. Elle se calcule selon la formule :

$Dj = gx - \alpha$ où :
 $\cos X = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h$

$$5 = 0,33281 - 22,984 \cos (ilJ) - 0,3499 \cos (2fiJ) - 0,1398 \cos (.'il J) + 3,7878 \sin (S2J) + 0,03205 \sin (2QJ) + 0,07187 \sin (3QJ)$$

$B = 0,12$ si x est en grades ; $B = 0,13$ si x est en degrés

x est l'arc décrit par le soleil entre le lever du soleil et son passage au zénith de la longitude du lieu dont la latitude est p . La déclinaison δ du soleil dépend du jour/quantième de l'année (1er janvier = 1) et de $Q = 2\pi/365,25$ le soleil décrivant sa trajectoire en 365,25 jours, a est un terme correctif, en unité angulaire, décrivant l'éventuelle fermeture de l'horizon par le relief.

Connue il y a inertie du système en un lieu donné, les rythmes thermiques ont un décalage temporel net avec les rythmes lumineux. Ainsi à Cîteaux (Côte d'Or) où nous avons travaillé l'écologie lombricienne, la température atmosphérique sous abri, à - 5 cm, - 20 cm, - 50 cm et - 100 cm dans le sol montre-t-elle des décalages caractéristiques avec la photopériode (fig. 2-1). Les organismes et organes (racines, tiges) des écosystèmes peuvent utiliser ces propriétés par exemple, les lombriciens anéciques, aux galeries verticales, régulent leur température corporelle par le choix de leur position dans le gradient thermique du sol (p. 208).

2.2.5. La température

La température est l'état thermique d'un système (en degrés). La chaleur est une énergie (énergie thermique) qu'il faut fournir (ou obtenir) pour un changement d'état : il y a cinèse énergétique sous forme d'agitation atomique et moléculaire (en Joules).

Chaleur latente : énergie nécessaire pour effectuer un changement de phase (évaporation, congélation, ...) dans un sens ou dans l'autre.

Chaleur de réaction : quantité d'énergie nécessaire pour (endergonie) ou produite par (exergonie) une réaction chimique.

Sans changement d'état, il peut y avoir perte ou accumulation d'énergie libre F (p. 65). L'énergie totale est $U = F + TS$ où TS est l'état thermique d'un système dont S est une variable d'état systémique (= entropie) et T la température absolue.

La chaleur spécifique est l'énergie accumulée (ou perdue) pour une élévation de température de 1°C (ou 1°K). L'agitation thermique croissante avec la température est nulle à 0°K (°K = °C + 273,15). En écologie l'accroissement de température a peu d'effet, jusqu'à 270°K (quelques degrés en dessous 0°C) car l'eau, principal vecteur des cinèses des systèmes écologiques (p. 110) est alors congelée. Si l'eau pure est gelée (solide à 0°C) dans la nature elle est souvent liquide quelques degrés en dessous 0°C en raison de ses impuretés (solution de sels, ...).

L'agitation thermique accroît, souvent de façon exponentielle, la probabilité des rencontres d'éléments donc des réactions chimiques, et partant biochimiques. La vitesse des réactions chimiques et biochimiques est généralement environ doublée pour une élévation de température de 10°C. Cela s'exprime par la convention $\text{Log } Q_{j_0} = 2$ où $\text{Log } Q_{j_0} = \ln(t) - t_2 \times \text{Log } V/V_2(t)$ et t_2 les températures d'observation des vitesses réactionnelles V_j et V_2 , exprimées usuellement en débit).

Vis-à-vis des structures relativement statiques, cette agitation moléculaire (énergie cinétique) a un rôle mobilisateur des éléments (devenant mobiles) : il y a perte de structures. L'organisation optimale des systèmes écologiques, permettant la maintenance partielle des structures et la cinèse des éléments, se situe donc au niveau terrestre (1 bar) dans les valeurs comprises entre 0 et 50°C. Toutefois, l'accroissement de pression, dans les eaux profondes, permet une température élevée sans désorganisation (p. 75).

La chaleur est dissipée sous forme de rayonnements infrarouges (p. 56).

Les énergies incidentes à l'écosphère sont variées. L'écosphère utilise celles-ci en les dégradant en chaleur et les ré-émet en énergie radiative infrarouge, l'ensemble étant globalement équilibré. L'énergie solaire arrivant sur l'atmosphère terrestre est réfléchiée pour un quart dans l'espace (19% par les nuages et 6 % par les poussières). Dans l'atmosphère un autre quart est absorbé par les nuages (5 %) et les molécules de certains gaz et poussières (10%). La lumière parvient à la surface du sol qui en reflète directement dans l'espace 3 %.

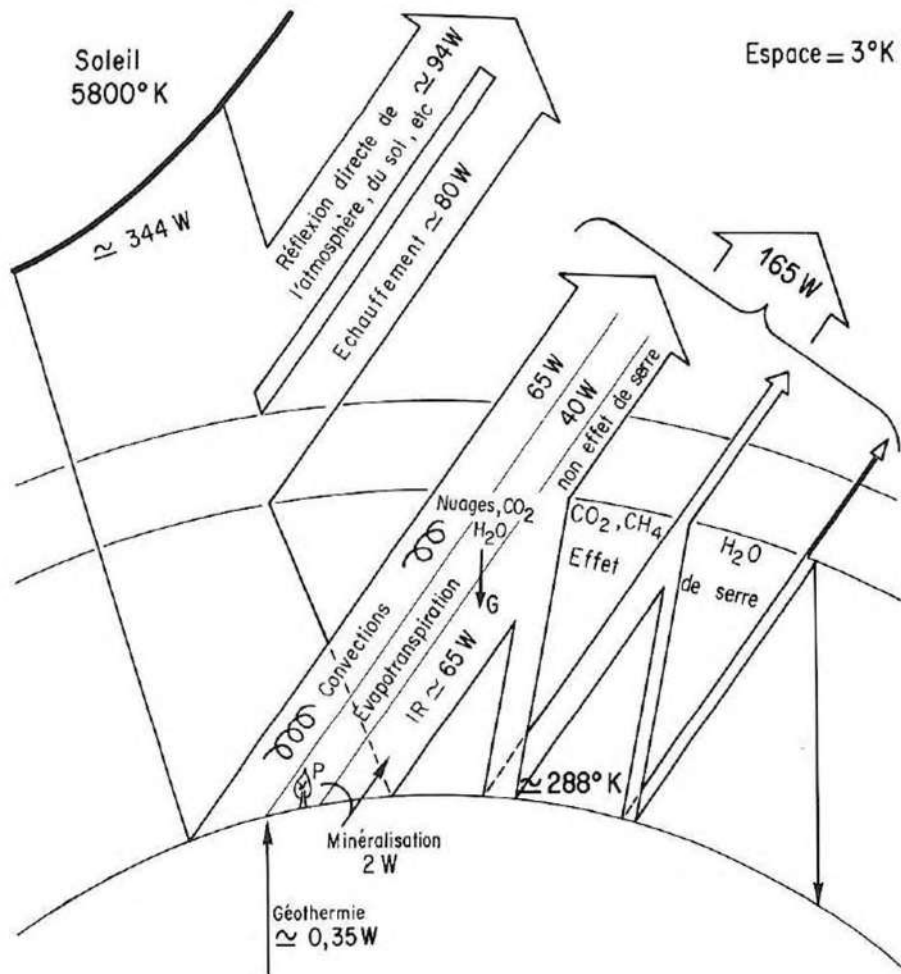


Figure 2-2 - Principaux flux radiatifs et énergétiques (en W/m^2 de sol superficiel terrestre) (valeurs d'après LAMBERT, 1987). Voir aussi les bilans atmosphériques fig. 2-4, p. 120. S — stratosphère, T = troposphère, G = géosphère.

Restent 47 % qui, joints aux 25 % accumulés dans l'atmosphère, vont constituer les forces animant les mouvements terrestres (vagues, vents, courants océaniques) et particulièrement les cycles hydriques (évaporation-condensation et la photosynthèse qui animera les organismes). Cette énergie radiante arrivant du soleil, un corps noir d'environ $5\,800^\circ\text{K}$, est ré-émise pour l'essentiel par l'atmosphère à 255°K , c'est-à-dire à une longueur d'onde très différente, dépendante du "corps noir" émetteur. A partir de l'atmosphère cette ré-émission se fait pour l'essentiel après réflexion entre terre et atmosphère. L'atmosphère absorbe en effet les longueurs infrarouges de ré-émission thermique par le CO_2 , CH_4 , ... et l'eau atmosphérique. Cette réflexion entraîne un effet "de serre" depuis l'atmosphère vers la terre. La terre est par ailleurs refroidie par les mouvements gazeux (p. 120) (fig. 2 2). Sans cet "effet de serre", la température au sol serait de 255°K (-18°C) (LAMBERT, 1987) alors

qu'elle est en moyenne de l'ordre de 13°C. Cet effet dépend des concentrations de $C(>2$ et CH_4 , qui augmentent actuellement de façon inquiétante (p. 166).

La répartition géographique et saisonnière de ces phénomènes varie avec la latitude, les reliefs et les saisons, le soleil ayant un angle d'incidence sur le globe fonction de sa périhélie (p. 112). Les ouvrages de climatologie traitent de ces phénomènes.

2.2.6. Solides dans l'écosphère

Les forces gravitationnelles sont telles que la terre est globalement stratifiée en couches de substrats concentriques. Celles-ci, à pression normale (= 1 bar), sont d'abord solides (grosses molécules organisées en ensembles denses = lithosphère), puis une enveloppe liquide (hydrosphère) regroupe les éléments moins denses et moins comprimés. Enfin emballant le tout, les gaz forment l'atmosphère (fig. 2-3)

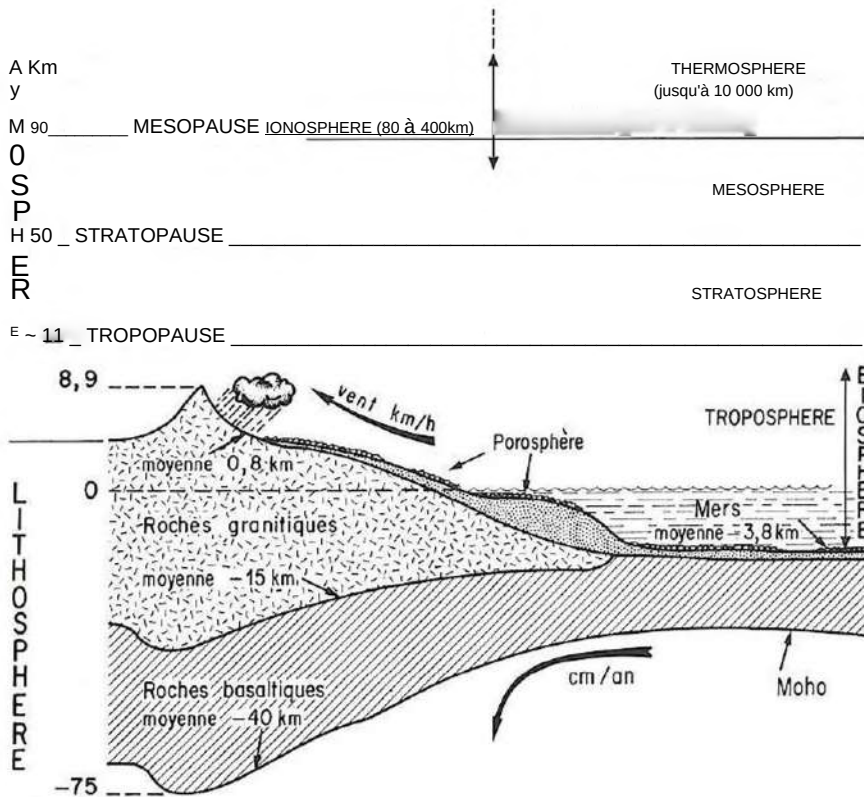


Figure 2-3 - Stratifications gravitaires des éléments du géoïde terrestre (les strates internes au globe sont négligées). Distance en km par rapport au niveau des mers (d'après EHRLICH et al., 1977, modifié).

Les pressions considérables existant au centre du globe tendent à induire une énorme réaction nucléaire dont l'énergie se dissipe à la périphérie sous forme de chaleur, de travail et d'énergie chimique. Cette énergie accroît la température de la périphérie de la partie solide (dite le manteau) au point de créer une liquéfaction relative de ce "solide" devenant visqueux dans la partie externe (= manteau) sur

laquelle surnagent des plaques refroidies qui forment des croûtes. En raison de mouvements de convection du manteau visqueux les croûtes craquelées, dites plaques, sont mobiles à la surface du globe et se heurtent, s'accumulent, se chevauchent au point que les plus légères forment des parties émergées : les continents ayant des zones de plissage ou reliefs.

(les croûtes superficielles sont décrites en géologie par la tectonique des plaques, et constituent la phase solide de l'écosphère. Elles sont constituées de solides issus directement du manteau (roches ignées) ou rejetées à l'état liquide (laves volcaniques). Elles sont aussi le résultat d'un travail mécanique de rupture de roches sous les poussées du manteau sous-jacent induisant des failles nombreuses associées à des tremblements de terre.

D'autres mouvements de fluides (eau, vent) entraînent des solides en suspension transformés en projectiles qui, avec des phénomènes de tension dus aux dilatations contractions (gels-dégels notamment), vont briser, éroder, pulvériser les solides en éléments fins auxquels vont s'adjoindre des solides produits par les réactions chimiques (y compris biochimiques) des systèmes écologiques à partir de leur soluté. Enfin sur ces solides plus ou moins pulvérisés (surface exposée aux érosions des fluides et aux écarts thermiques) les réactions chimiques agiront en modifiant la nature initiale des minéraux tant ignés que secondaires.

Ainsi les solides de l'écosphère sont-ils pour une part non négligeable dissociés en éléments, souvent plus ou moins solidement réassociés par des liaisons secondaires et forment un système discontinu entre lequel il y a des pores, (les dépôts, issus de roches réassociées, s'appellent sols en milieux émergés et sédiments en milieu immergé. Le tout forme la porosphère.

Entre les solides de la porosphère, il y a évidemment des fluides, essentiellement eau ou air en rapports variables.

En simplifiant, on peut retenir que sur un socle massif relativement très stable (aux mouvements tectoniques des plaques près) se déposent des solides particuliers de taille variable formant la porosphère, dont les pores sont remplis de fluides (eau, air). Ces roches peuvent être des roches ignées, issues de la matière constitutive du globe ou après une transformation biologique, des roches biogéniques (houille, calcaire, pétrole, lignite, certaines silices) et des remaniements plus ou moins importants des deux (roches métamorphiques).

2.2.7. Eléments biogènes

Le globe, et plus précisément à sa périphérie l'écosphère, est énergétiquement un système ouvert mais est du point de vue des éléments chimiques un système fermé (p. 64). L'importance relative des éléments jouant à la superficie du globe un rôle est l'une des propriétés essentielles de l'écosphère puisque ceux-ci, mus par les échanges énergétiques de l'écosphère (énergétiquement un système ouvert), se recombinaient en suivant une organisation relativement précise (p. 133) à partir de leurs propriétés électromagnétiques (p. 53). Evidemment, ces éléments chimiques sont, pour la plupart, les constituants des sous-systèmes biologiques (organismes) ; dans ce cas ils sont appelés éléments biogènes. L'importance relative des principaux d'entre eux est présentée au tableau 2-1.

	NUMERO MASSE ATOMIQUE ATOMIQUE	ECOSPHERE ATMOSPHERE HOMME		PLANTE LITHOSPHERE	
		% masse (1)	ppm masse (air sec)	% masse (1)	blé (%ms) (2)
Hydrogène	1	0,95	0,43	9,31	6,24
Carbone	6	0,18	134,0	19,37	43,57
Azote	7	0,03	755,10 ³	5,17	1,46
Oxygène	8	50,02	232,10 ³	62,81	44,3
Fluor	9	0,10	-	0,009	0,01 à 1
Sodium	11	2,36	-	0,26	2,8
Magnésium	12	2,08	-	0,4	2,1
Aluminium	13	7,30	-	0,001	0,11
Silicium	14	25,8	-	-	1,17
Phosphore	15	0,11	-	0,64	0,20
Soufre	16	0,11	-	0,63	0,17
Chlore	17	0,20	-	0,18	0,14
Potassium	19	2,28	-	0,22	0,92
Calcium	20	3,22	-	1,36	0,23
Manganèse	25	0,08	-	0,0001	0,04
Fer	26	4,18	-	0,005	0,08

(1) d'après RAMADE (1984)

(2) d'après LATSCHAW et MILHER (1924), cités par HELLER R. (1964).

Tableau 2-1 - Importances relatives des divers éléments biologiques dans l'écosphère

2.2.8. Constituants de l'écosphère

L'écosphère est en définitive le système biophysicochimique du globe : l'absence de la vie signifie que l'on quitte l'écosphère soit dans les profondeurs de la croûte terrestre, soit dans la haute atmosphère. Ce système échange évidemment avec le globe (notamment par les émissions volcaniques et les mouvements tectoniques d'abduction) et avec la stratosphère et la troposphère... et bien au-delà (énergies radiatives).

Les constituants majeurs de cette écosphère sont organisés sous l'effet des pressions gravitationnelles en couches de densité approximativement concentriques (fig. 2-3) : la masse "solide" (au cœur et à la périphérie, la viscosité du manteau étant relativement faible) ou lithosphère ; la masse "liquide" - essentiellement hydrique - ou hydrosphère. La masse gazeuse - essentiellement oxygène et azote-gaz - ou atmosphère. Dans ces masses solides, liquides ou gazeuses sont dispersées les autres phases. Les solides piègent des liquides et des gaz (inclusions) ; l'atmosphère transporte de la vapeur d'eau, des gouttelettes et des solides (aérosols) ; l'hydrosphère inclut des suspensions, émulsions, gaz...

Ces couches sont traversées d'échanges, de rayonnements, de turbulences qui seront décrits succinctement au paragraphe suivant. Leurs états thermiques, hydriques et de turbulences sont décrits classiquement pour l'atmosphère, par la climatologie ou science des climats. En fait, ces échanges dépendent de relations cosmiques (principalement soleil-terre) mais aussi des "inerties" thermiques et hydriques des océans et continents d'une part, et, d'autre part des irrégularités des reliefs émergés.

Les échanges d'énergie entre lithosphère, hydrosphère et atmosphère créent des états atmosphériques souvent considérés seuls comme "climat". Toutefois, par commodité, je distinguerai dans cet ouvrage l'atmoclimat (climat atmosphérique classique) du pédoclimat (climat du sol = porosphère émergée) en négligeant, du fait de ma spécialisation, l'hydroclimat" des masses aqueuses. Un déphasage saisonnier des conditions moyennes thermiques et hydriques existe entre atmoclimat et pédoclimat (fig. 2-1, p. 1 12).

Les sols constituent les systèmes écologiques les plus complexes qui soient en raison de leur structure fondamentalement triphasique mais aussi en raison de leurs constituants, roches biogéniques, ignées ou métamorphiques remaniées, de façon diverse et complexe se modifiant en permanence dans des échanges de solides, liquides, gazeux où chaque phase est incluse dans l'autre aux diverses échelles d'observation biotique et abiotique. C'est un système très complexe et opaque dont l'étude est effectuée soit de façon restrictive (un ou quelques points de vue, choisis « *priori* ») ou/et hors champ écologique (études en microcosme) à partir d'hypothèses souvent non réfutables : nous reviendrons souvent sur ce domaine, véritable défi à l'écologue.

2.3. Cinèses (mouvements et blocages)

2.3.1. Motricité générale

Les constituants des écosystèmes (p. 109) forment un ensemble d'échanges d'énergie et matière. Opérationnellement, les modalités d'étude de l'écosphère conduisent à schématiser, à compartimentaliser cette écosphère en sous-ensembles et à étudier ce grand système selon une hiérarchie systémique (p. 94) qui peut adopter diverses modalités, toutes partiellement arbitraires, puisque ce système est un tout.

Ces échanges énergie-matière constituent les cinèses résultant de forces permettant ces mouvements. La force principale animant l'écosphère est d'origine solaire. Les écarts de température, journaliers, saisonniers et pluriannuels, tiennent aux relations réciproques de notre planète par rapport au soleil, et aux réactions thermonucléaires agitant la surface du soleil, émettant de l'énergie-matière radiative ($5\,800^{\circ}\text{K}$) reçue par le globe qui réémet celle-ci à basse température (255°K en moyenne) (p. 111).

Cette énorme différence de potentiel thermodynamique (entre la source chaude et froide, de $5\,545^{\circ}\text{C}$ en moyenne, p. 64) va constituer le moteur des mouvements de l'écosphère. Les modalités des mouvements sont toutefois organisées, structurées par les états physiques et les propriétés chimiques des constituants du système qui absorbe cette énergie sous différentes formes. Ces modalités portent sur des échanges thermiques pouvant transitoirement être relayés par des réactions photochimiques et chimiques et par des forces gravitationnelles ou/et de Van der Waals, voire des interactions faibles.

La part la plus importante de cette énergie est immédiatement dissipée en travail entraînant le mouvement, tandis qu'une petite fraction est absorbée temporairement dans des liaisons chimiques covalentes (photosynthèse, formation d'ozone, ...).

Ce travail se traduit essentiellement par des dilatations, ce qui implique changement de densité, donc de position dans l'organisation concentrique des fluides autour de la terre : air et eau chaude montent dans les vents ascendants et les hydro-ascensions marines et des changements d'état, notamment évaporation absorbant l'énergie en vapeur d'eau et, après refroidissement en haute altitude, condensation d'eau. Il y a une dépense énergétique ascensionnelle, anti-gravitaire.

La figure 2-4 résume ces grands mouvements qui ne sont pas que verticaux mais également horizontaux, en raison de différences d'exposition saisonnière, et journalière à l'énergie solaire et des différences de propriétés (notamment de capacité calorifique et d'absorbance) des substrats récepteurs et ré-émetteurs (air, eau, sols).

Remarquons que si l'on peut globalement schématiser les échanges énergétiques responsables de la motricité et des changements d'état des compartiments de l'écosphère par des bilans énergétiques, ces énergies prennent des formes très variées : énergie chimique dont biochimique, énergie potentielle, énergie cinétique, chaleur latente, etc (p. 52, 64, 156).

Mais ces diverses énergies, respectant les principes de la thermodynamique, se dégradent et finalement sont ré-émises dans l'espace par rayonnement.

Dans ce bilan global, il y a peu d'échange de matière avec l'espace. L'écosphère est à peu près (météorites, échanges avec le manteau, ...) un système chimiquement fermé (avec toutefois 100.10^3 T/an d'apport de poussières cosmiques, p. 121), alors que énergétiquement il est essentiellement ouvert.

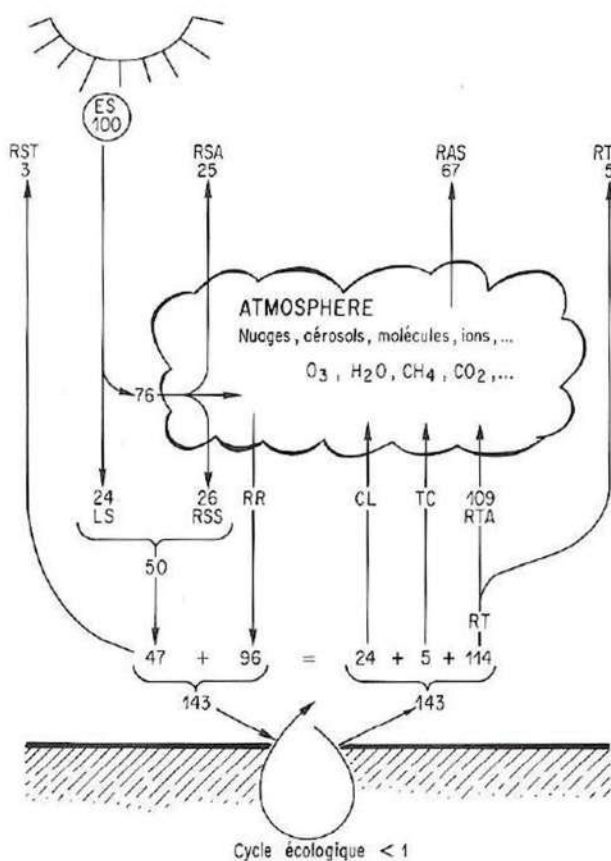


Figure 2-4 - Echanges énergétiques dans l'atmosphère et l'écosphère exprimés en % de l'énergie solaire (ES). La géothermie est négligée, (cf. fig. 2-2, p. 114). La lumière solaire est directement incidente (LS) ou après réémission atmosphérique (RSS) est en partie réfléchi par le sol vers l'espace (RST). Le sol reçoit en outre des radiations de réflexion (effet de serre) (RR) dues au rayonnement terrestre (RT) qu'il produit vers l'atmosphère (RTA), une fraction diffusant vers l'espace (RTS). L'atmosphère reçoit aussi du sol l'énergie de chaleur latente (CL) (restitution de l'énergie d'évaporation par condensation de l'eau, ...) et de conductance (TC), l'ensemble étant réfléchi vers la terre. (RR) ou émis par radiation de l'atmosphère vers l'espace (RAS) conjointement avec l'énergie solaire directement réfléchi (RSA) (d'après EHRlich et al., 1977, modifié).

Ces divers mouvements sont à l'origine de tout fonctionnement de systèmes dans l'écosphère, non seulement en raison des échanges entre portions d'espace terrestre (que l'on peut considérer comme compartiments), mais en raison des changements d'état qu'ils entraînent : condensation, réactions chimiques, croissances organiques, accumulations locales, etc.

Avant d'aborder l'organisation des systèmes écologiques eux-mêmes (p. 133) nous allons décrire la nature, les modalités les plus importantes des cinèses intervenant dans les systèmes gazeux (atmosphère), liquides (hydrosphère, p. 121), solides (lithosphère, p. 123) incluant le cas de blocages et mouvements chimioénergétiques (p. 124). Les modalités particulières de cinèses résultant de l'activité biologique seront brièvement décrites (p. 124) avant d'aborder le cas de la très complexe porosphère (p. 130) et le problème conceptuel de la schématisation minimale des écosystèmes (p. 131).

2.3.2. Mouvements gazeux : l'atmosphère

Il n'entre pas dans le cadre de cet ouvrage de détailler les mouvements gazeux de l'atmosphère, étudiés par la climatologie et résultant des turbulences animées par les différences thermiques des masses continentales, des océans et des apports énergétiques spatiaux. La rediffusion de l'énergie vers l'espace joue aussi un rôle important dans ce moteur thermodynamique (fig. 2-4).

L'écosphère proprement dite n'inclut que l'atmosphère inférieure où s'accumulent les gaz lourds et l'eau ; c'est la troposphère dont l'épaisseur est de 7 à

15 km. Concentriquement les autres gaz s'accumulent autour de la géoïde terrestre. Ces couches absorbent ou non l'énergie solaire de façon différentielle. Outre les échanges énergétiques, il y a de nombreuses réactions photochimiques et d'une façon générale la formation d'atomes libres très réactifs ou d'ions (p. 111) (ionosphère). Des réactions se produisent en permanence dans ces gaz, y compris ceux issus de l'écorce terrestre, dont ceux résultant des activités humaines.

Différentes schématisations modélisent les mouvements climatiques en terme de cellule de convection expliquant qu'en général certaines zones sont parcourues de mouvements ascendants tandis que d'autres reçoivent des courants descendants et que la plupart sont parcourues de vents horizontaux très variés mais pouvant être localement réguliers (alizés, ...). Même si cette ordonnance souffre "instantanément" de nombreuses variations, des tendances climatiques générales s'en dégagent. En outre les propriétés d'échanges thermiques entre atmosphère, océan, milieu terrestre et l'effet des reliefs, constituant des obstacles aux vents horizontaux, diversifient ces mouvements et, par conséquent, les climats locaux.

Le travail développé par les turbulences atmosphériques entraîne un brassage permanent des éléments de l'atmosphère y compris les suspensions aqueuses et solides. Les vents élèvent dans le ciel les poussières et parfois des objets plus conséquents, des organismes (notamment les microorganismes, des pollens, des graines, des pucerons, ...) mais aussi les "suspensions" formées par les aérosols. Ceux-ci sont constitués d'une centaine de milliers de tonnes/an de poussières cosmiques, ce qui n'est pas négligeable au regard des émissions par les mers sous forme d'embruns et microgouttelettes projetées à partir de la composition très particulière de l'ultime couche superficielle des mers (enrichie en nombreuses substances, notamment lipophiles). Les mers injectent dans l'atmosphère environ 60 millions de tonnes par an d'aérosols tandis que les sols fournissent 100 millions de tonnes... auxquelles s'ajoutent de nombreuses fumées industrielles, des éruptions volcaniques et les explosions nucléaires aériennes. L'atmosphère et les vents peuvent alors être regardés comme les véhicules, non seulement des gaz, objets de ionisations et d'une physico-chimie active complexe, mais aussi des particules chimiques d'éléments les plus divers, y compris les composés fabriqués par l'homme (LABEYRIE, 1978). L'atmosphère est également un véhicule de vapeur d'eau qui en se condensant forme les précipitations participant ainsi aux mouvements de l'hydrosphère. Enfin, elle diffuse elle-même dans l'hydrosphère et la porosphère (p. 137).

2.3.3. Mouvements et blocages hydriques

L'hydrosphère, dont la masse principale est celle des mers et océans, diffuse également dans l'atmosphère (vapeur d'eau et précipitations) où elle contribue à produire les aérosols décrits ci-dessus. Ce sont même eux qui constituent les points de cristallisation ou de condensation de l'eau en surfusion (= vapeur d'eau en dessous de 0°C).

Le soleil en chauffant les surfaces humides assure l'évaporation transitoire de masses d'eau qui ultérieurement, en rencontrant de l'air froid de la haute atmosphère précipitent et assurent un apport d'eau (= précipitations) sous forme généralement de pluie. Il s'agit d'un apport fonctionnellement très important qui va intervenir comme

- a) transporteur par gravité de solutés et suspensions,
- b) élément constitutif de la matière organique,
- c) volant thermique (forte chaleur spécifique — capacité thermique),
- d) accumulateur d'énergie cinétique qui se traduira par les chutes et écoulements gravitaires.

En accumulant de l'énergie cinétique cette eau précipite sur les surfaces hydriques mais aussi sur les terres émergées. Il peut y avoir blocage temporaire sous forme de neige et glace.

Ces effets gravitaires assurent :

- a) l'entraînement des composés aériens particulaires ou gazeux hydrosolubles qui vont être apportés par les précipitations (ammoniaque, acides sulfureux des pluies acides, poussières, éléments biogènes et autres),
- b) le lavage des solides exposés à la pluie et notamment les exsudats et poussières sur les végétaux,
- c) l'entraînement dans les sols ayant une percolation/infiltration. On y distingue deux mécanismes d'entraînement hydrique, souvent concomittants : la lixiviation ayant trait aux solutés et le lessivage ayant trait aux suspensions,
- d) l'érosion éventuelle des sols exposés aux flots des ruissellements.

Les apports d'eau sur les terres émergées sont liés au cycle hydrique d'évaporation-condensation avec globalement des mouvements ascendants et descendants et des vents horizontaux qui échangent la température, changent de pression (la pression change très vite avec l'altitude) et se déplacent selon des mécanismes thermodynamiques où le soleil joue le rôle de moteur majeur. Les rythmes saisonniers tropicaux (saison sèche, saison humide), peri-tropicaux (désertiques ou subdésertiques), tempérés et glacés, sont grossièrement réglés par ces mécanismes décrits en terme de cellule de circulation atmosphérique (ex. cellule de Hadley, un courant relativement régulier) et de vortex centrés sur des hautes ou basses pressions. Les masses continentales, marines ou glaciaires, ayant des chaleurs spécifiques différentes jouent un rôle important, ainsi que les reliefs, pour expliquer la mosaïque de variabilités des précipitations. Ces précipitations sont ensuite tamponnées par le système biophysicochimique de réception au sol, de façon fort variable, suivant son état.

Les eaux se précipitent en des localités d'autant plus intensément que ces localités constituent des obstacles et que les masses d'air en mouvement doivent contourner des reliefs en augmentant leur altitude c'est-à-dire pénétrer des zones froides, favorables aux condensations. Les précipitations (pluie, neige, grêle, ...) qui en résultent sont interceptées par les végétaux notamment les arbres, lavent les organes aériens et sont soit ré-évaporées soit atteignent le sol où elles ruissellent à sa surface ou s'infiltrant. Environ (50-70 % de l'eau peut être ré-émise par évapotranspiration le reste étant évacué par l'écoulement, des cours d'eau. Cette évapotranspiration étant constituée de l'évaporation au sol, de l'évaporation sur organismes de l'eau interceptée et de la transpiration (p. 126). Interception et transpiration, étant essentiellement le fait des végétaux, des arbres notamment (ALJSSENAC, 1980), jouent une part variable en fonction des climats et végétations. Localement les transformations de la végétation modifient donc le rapport évapotranspiration/ écoulement, donc le ruissellement éventuellement érosif (p. 488).

L'eau pénètre les solides continentaux et la porosphère quelle remplit et traverse partiellement. Cet écoulement dans la porosphère dépend : 1° des possibilités d'écoulement général sous-jacent ou non : du drainage naturel (ou artificiel) qui à l'échelle de la parcelle permet l'évacuation ou l'accumulation locale (en "mouillière"), 2° de la percolation pédologique verticale de l'eau à l'échelle du profil de sol (1 à 2 m de sol) qui est fonction de l'organisation "interpédique" (entre mottes, CHRETIEN, 1987) du sol, soit morcelé (fente de retrait en sol argileux, labour), soit, plus généralement, perforé (galeries d'animaux), 3° de l'imbibition intrapédique dans la matrice des mottes du sol ; cette réserve, qui se charge et se vide dépend des forces qui la lient aux tensions (force de Van der Waals) du sol et des organismes, dont les racines qui utilisent cette réserve (fig. 8-4, p. 520).

L'eau interagit chimiquement et physiquement tant dans l'abiOS que dans les êtres vivants. Elle s'écoule enfin sur et dans celle porosphère jusqu'au niveau marin selon le relief des continents, y compris dans des zones d'intense circulation (cataractes) ou de stagnation (lacs).

Dans les masses aqueuses (mers, lacs, océans) l'eau est, comme l'air, l'objet de mouvements qui dans la cinétique de la rotation terrestre générale sont largement

des échanges thermiques mais aussi aux relations thermodynamiques entre les fluides de l'atmosphère/hydrosphère. Il y a à la fois échanges de chaleur et d'énergie cinétique (les vents créant des courants superficiels). On reconnaît alors les courants marins (dont le célèbre (Juif Stream) en tant que composantes horizontales de ces déplacements d'eau (et de thermies et éléments liés) et les hydro-ascensions ("upwellings") en tant que mouvements verticaux (compensés par des mouvements descendants).

Ces hydro-ascensions peuvent être dues au franchissement des seuils du support solide de la croûte terrestre par des courants subhorizontaux. Par exemple, ceux du détroit de Gibraltar se caractérise depuis la Méditerranée par :

- une entrée d'eau peu salée superficiellement depuis l'océan atlantique,
- une sortie en dessous d'eau salée, chargée en nutriments et issue de la profondeur. Cette sortie est "relativement" faible car le bilan d'évaporation de la Méditerranée est négatif par rapport aux apports des fleuves.

Les hydro-ascensions sont aussi liées à des différences thermiques et à des phénomènes de cavitation dus à un entraînement cinétique (rotation terrestre, poussée des vents). Elles sont très importantes en permettant le mouvement inverse des effets gravitaires (sédimentation des éléments nutritionnels notamment).

Ces hydro-ascensions remontent les éléments nutritifs vers la surface, où le rayonnement solaire photosynthétiquement utilisable pénètre. Ces deux apports permettent le développement du phytoplancton et des organismes qui en dépendent. La richesse biologique des mers en résulte (MARGALEF, 1984).

D'une façon générale, les mouvements hydriques en transportant les éléments biogènes et nutriments facilitent l'accès de ceux-ci aux organismes (planctons, ...) et organes (racines, ...).

2.3.4. Mouvements et blocages des solides

Seule la croûte terrestre superficielle concerne l'écosphère . Cette lithosphère est constituée de plaques émergées ou immergées qui se déplacent à la surface du globe en raison essentiellement des forces développées dans le manteau visqueux sous-jacent par la thertnogénèse terrestre (fig. 2-3. p. 115). Ces plaques continentales ou sous-marines "glissent" sur le manteau visqueux, les unes vers les autres, s'incurvent vers le manteau sous-jacent (subduction) ou se développent à partir de l'abduction de matériaux sous-jacents entraînés par les mouvements de turbidité du manteau. La géologie, et plus précisément la tectonique des plaques, décrit ces mouvements. Ceux-ci ont la propriété, d'un point de vue écologique, de permettre la remontée d'éléments chimiques denses en hauteur (sur les montagnes ou dans les rifts) et aussi d'en entraîner en profondeur, hors écosphère (parfois temporairement : rejets par volcanisme des plus "légers").

Mais ce mouvement sub-vertical expose les roches superficielles ; elles se déplacent, se dissolvent, s'éclatent, se brisent et se recombinaient chimiquement ou biochimiquement sous l'effet des aléas climatiques et du travail mécanique des fluides et des organismes. Ce travail superficiel, ces mouvements de surface seront détaillés avec la porosphère (p. 130).

Le remaniement ainsi créé est également horizontal. Les continents se déplacent : c'est la dérive des continents, initialement décrite par WEGENER (1920), entraînant avec elle les éléments continentaux, roches et organismes.

Les transports sur grandes distances se font dans les parties émergées par érosion éolienne (aérosols) et hydriques suivis de dépôts d'alluvions. Plus localement, les reliefs tendent à combler les dépressions par des colluvions de sorte que les sols héritent des éléments depuis la roche mère sous-jacente, depuis des alluvions/colluvions et de façon plus diffuse, mais importante pour les éléments chimiques rares, depuis les aérosols..

D'un point de vue systémique, la lithosphère constitue la part la plus inerte, la moins "fonctionnelle" mais aussi la plus permanente (la plus régulatrice) de l'écosphère (p. 89).

2.3.5. Mouvements et blocages chimio-énergétiques

Les grands brassages convectifs de l'atmosphère (p. 120), de l'hydrosphère (p. 121) et de la lithosphère (ci-dessus) incluent en permanence les échanges chimio-énergétiques comme sous-ensembles. Les forces électromagnétiques y jouent un rôle essentiel. Au-dessus de l'écosphère, l'ionosphère absorbe les poussières cosmiques et l'énergie sidérale (solaire incidente) dans un système gazeux ionisé. Cet ensemble forme des atomes, radioactifs ou non, qui en permanence diffusent vers les systèmes écologiques où ils s'incorporent ou/et se dégradent (isotopes instables). Réciproquement, la troposphère injecte en grande altitude des éléments issus des systèmes écologiques ou des industries (NO, NO₂, ...).

La très grande disparité de distribution des éléments chimiques sous des formes moléculaires, ioniques, etc (tableau 2-1, p. 117) fait que leur disponibilité peut être considérable ou au contraire en faire des "facteurs limitants" dans les écosystèmes.

En tant qu'élément chimique, leur résidence (temps moyen dans un compartiment) peut être considérable. On a calculé (EHRlich *et al.*, 1977) cette résidence dans l'atmosphère à 64 millions d'années pour l'azote et 7 500 ans pour l'oxygène ou encore dans l'eau de mer respectivement à 260, 45, 11 et 8 millions d'années pour le sodium, le magnésium, le potassium et le calcium. Le carbone qui ne représente que 0,18 % de la masse écosphérique a un temps de résidence beaucoup plus faible (27 ans en nécromasse, 17 ans dans les organismes terrestres et 5 ans dans l'atmosphère et seulement 0,10 an dans les organismes océaniques). En fait ces calculs sont très incertains (p. 502) et risquent fort d'être revus dans le sens d'un recyclage beaucoup plus rapide. Le cas de l'azote mérite d'être à cet égard souligné ; sa forme pure, gazeuse (N₂) paraît comme très inerte alors que ses autres formes ont des temps de résidence qui peuvent être très biefs, lorsque les mesures sont effectuées en conditions écologiques (10 % par jour, dans un lombricien, p. 150).

2.3.6. Mouvements et blocages biologiques

Les transports biologiques sont des mouvements organisés et orientés de matières dans les écosystèmes, il s'agit de phénomènes quantitatifs à ne pas confondre avec la colonisation, phénomène essentiellement qualitatif où un fondateur quantitativement négligeable, apporte une nouvelle qualité (= l'espèce) au système qui le reçoit.

Dans les écosystèmes l'orientation des transports biologiques apparaît très généralement comme un complément des mouvements physiques en permettant de

- a) compenser, par mouvements ascendants, les chutes gravitaires,
- b) lever des blocages (stockages) qui ralentissent ou arrêtent les cycles chimio-énergétiques.

Nous n'envisageons ici que les modalités de transport en ne prenant pas en compte les processus physicochimiques (malaxage, tassement, canalisation, désorption, ...) qui y sont liés.

1. Transport cellulaire et péricellulaire

Ces transports sont de distance limitée, ils caractérisent les êtres unicellulaires sans vacuoles digestives et portent donc sur des distances très faibles. Par exemple, des déplacements très limités s'observent dans les racines susceptibles d'ouvrir leurs voies de pénétration dans le sol par dissolution des carbonates, surtout CO₃Ca, et

précipitation de ce dernier dans les vacuoles racinaires qui, après mort des racines, abandonnent dans le sol un sable cytogénétique (fig. 2-5) (JAILLARD, 1987) ; dans ce cas 25 % du sable était cytogénétique.

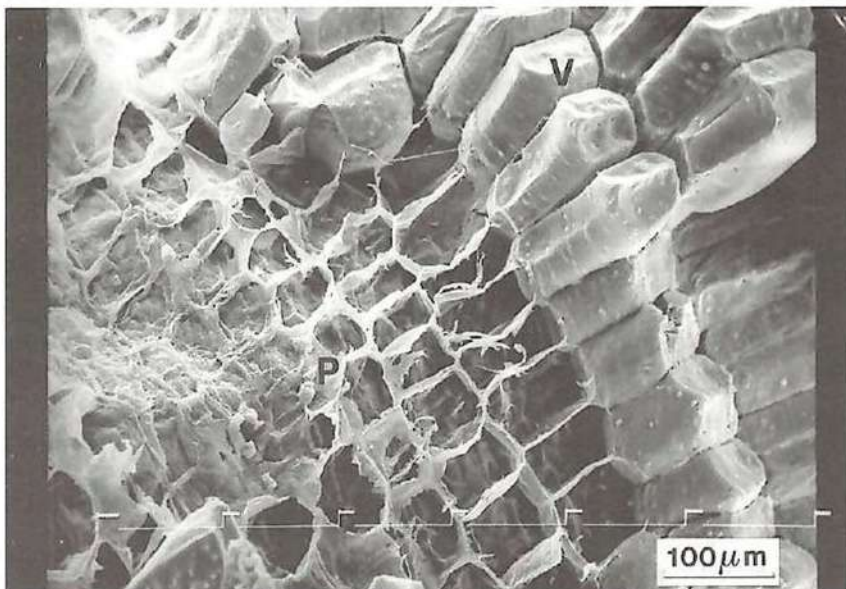


Figure 2-5 - Formation du sable cytogénétique : cellules *e.alcitisées* de graminées, avec grains représentant la concrétion de la vacuole (V) et parois cellulaires fossilisées (P) fd'après JAILLARD, 1953).

L'importance des transports péricellulaires et cellulaires est considérable car elle commande d'autres transports biologiques cl constitue une mobilisation d'éléments chimiques spontanément peu solubles dans les conditions purement physicochimiques prévalant dans l'écosphère. Nous verrons (p. 133) que l'entrée énergétique dans les systèmes biologiques, s'effectuant essentiellement au niveau végétal, conduit à trois conséquences simultanées. 1) Une réduction chimique des éléments. Le carbone essentiellement se charge ainsi en électrons. 2) Un débit électronique (suivant une dpb) transportant ces électrons par une série de réactions d'oxydoréduction. 3) Cette réaction initiale de réduction du carbone oxydant l'oxygène du gaz carbonique revient à créer des conditions d'environnement basique (globalement "neutralise" H^+), tandis que les réactions de dégradation énergétique créent, dans l'entour de la "décomposition", des conditions acides ; H^+ est graduellement libéré dans le milieu.

Celle "machine biochimique" est donc un système écologique échangeant avec le milieu et agissant sur celui-ci par actions télémétaboliques tant avant assimilation qu'après émanation.

Si l'on considère le système à deux compartiments "milieu extracellulaire et cellule", le fonctionnement cellulaire, exergonique, va agir par télémétabolisme sur son milieu (immédiat) en excréant des substances à potentiel acide (décomposition) ou basique (fixation chlorophyllienne) et d'autres substances, dont des enzymes, et va assimiler sélectivement certains éléments nutritifs surtout à l'état ionique minéralisé (plantes) ou organiquement énergétique (hétérotrophes). De ce point de vue la cellule, ou l'organe, peut être regardée comme "le moteur" d'une action de déblocage (action extramétabolique par modification des conditions d'alcalinité/acidité et par production d'exo-enzymes). Ainsi par ce mécanisme, à l'interface (unicellulaire/milieu, racine/sol

ou intestin/entèrè), de profondes modifications de l'entour des cellules sont observables. Ces réactions sont spectaculaires par l'accélération des réactions qu'elles permettent, à la fois par l'organisation catalytique (exo-enzymes) et par l'injection énergétique (acidité - alcalinité) du flux électronique ou protonique.

Ainsi les réactions d'oxydo-réduction sont sensiblement accélérées. Par exemple, dans les mêmes conditions de milieu, l'oxydation de Fe^{++} en Fe^{+++} est accélérée de 240 fois si des thiobacilles sont présents. L'action des microorganismes notamment, s'exerce dans pratiquement toutes les chaînes des processus d'altération et de dégradation des roches sédimentaires ou endogènes. Ainsi les roches endogènes (représentant les plutonites comme les granites, les vulcanites comme les basaltes et les roches métamorphiques) constituant 95 % des roches à la surface de la planète sont activement altérées par les organismes (y compris les "agencements" plus ou moins laches de macro et micro-organismes, p. 228) par la production d'acides s'attaquant aux alumino-silicales qui augmentent notamment la solubilisation de la silice ou de l'aluminium. En outre, les produits organiques complexants favorisent la formation de complexes organo-minéraux.

Ces processus très variés en fonction des conditions régnant dans l'écosphère, depuis les sources hydrothermales sous-marines jusqu'aux conditions relativement anhydres et oxydantes des milieux terrestres émergés tropicaux ou subdésertiques, conduisent à une véritable géochimie du paysage. Cette géochimie concerne tant le minéralogiste (localisation des gisements de métaux concentrés par actions biologiques passées) que le pédologue et l'agronome intéressés par les propriétés physicochimiques des sols. Son importance biologique est considérable car elle permet, par l'accélération des mobilisations, de fournir les organismes en éléments biogènes sinon souvent indisponibles (cas du phosphore, p. 172).

2. Transport mycélien, "horizontal" (cycloplasmose)

Proche physiologiquement du précédent mouvement mais très développé, la cycloplasmose intracellulaire est un mouvement important très caractéristique.

Les champignons ayant des mycéliums aux cellules longilignes apparaissent essentiellement comme des échangeurs d'éléments sur des distances importantes (du décimètre au décimètre).

Le transport mycélien dépend de la diversité des systèmes mycéliens développés à partir de leur rhizomorphe souvent en symbiose avec les racines. Les myceliums non seulement transportent horizontalement sur plusieurs mètres mais ont en "amont" des aptitudes remarquables tant pour la lyse de la matière organique morte (p. 141) que pour la solubilisation des éléments biogènes peu mobiles, dont le phosphore tricalcique en milieu calcaire ou les phosphates de fer et d'aluminium en milieux acides.

3. Transport phytovasculaire "vertical"

Il s'agit de l'un des plus évidents et importants mouvements à dominante ascendante. Les végétaux vasculaires fonctionnent en effet comme des systèmes hydriques ouverts pompant dans le sol l'eau et ses solutés, ils les transportent (sève brute) vers les parties aériennes où l'eau est transpirée pour une large part via les vacuoles des tiges et feuilles avec sudation partielle d'exsudats aériens. Cette transpiration porte couramment sur 4 000 à 10 000 T/ha/an d'eau. Ce procédé de transport biologique est l'un des éléments qui s'oppose aux mouvements gravitaires de lessivages hydriques et lixiviation. Il est essentiellement à composante verticale, associé à des mouvements horizontaux (aux niveaux mycéliens, racinaires et des tiges), utilisant, outre l'énergie biochimique, les forces de Van der Waals liées à l'évaporation et à la capillarité.

En période de végétation dans les forêts, ce mouvement ascendant est considérable, il est de l'ordre de 200 l par jour d'eau sous forme de sève par arbre, s'élevant à la vitesse de 7 m/h en entraînant de très nombreux éléments chimiques

(N, P, K, Mr>, Si, ...) vers la frondaison et en permettant ainsi, avec la chute des organes épigés une recharge du sol par le haut (= anti-lxiviation).

4. Transport endentérien endocorporel et "vertical"

Les animaux mais aussi certains protistes sont phagotrophes (p. 222) et peuvent donc temporairement accumuler une fraction du milieu extérieur : dans un tube digestif ou une vacuole digestive. Leurs déplacements les conduisent à relâcher après digestion ce milieu extérieur par défécation ou régurgitation. Ces mouvements peuvent être localement d'une très grande importance par la concentration qu'ils représentent. Nous pouvons le constater dans deux cas où ces mouvements s'achèvent par un blocage.

1) Pour les oiseaux, il peut y avoir concentration locale tout à fait remarquable, la plus évidente étant celle de l'accumulation de guano sur les îles marines où les oiseaux viennent nidifier ou dormir. Ces accumulations de guano constituant des accumulations considérables faisant l'objet d'une exploitation importante (guano des îles Chinchas (Pérou) estimé à 12 400 000 T en 1863 : source : congrès de Lima, In PIERRE, 1870). Le mouvement de guano est estimé actuellement à 3,6 MT/an assurant un mouvement de phosphore océans—>—continents (fig. 2-21, p. 174).

2) Pour les mammifères, l'abandon çà et là de fèces constitue des milieux particuliers dont l'importance est physiquement non négligeable dans le cas de systèmes anormalement bloqués. C'est le cas en Australie, où des vaches ont été introduites par l'homme moderne, sans son cortège de consommateurs de fèces. Faute de ces derniers, les bouses disparaissent lentement et peuvent couvrir jusqu'à un quart de la surface du sol.

Mais le mouvement endentérien le plus important est le fait de la biomasse animale dominante, celle des lombriciens. Le tonnage de sol remonté sur la surface est, en France, de l'ordre de 70 l/ha/an. Il s'agit ici d'une compensation du tassement du sol, le brassage intestinal dans le sol étant probablement de 2 à 4 fois supérieur.

Ce sol remonté a pu être caractérisé, quant à son origine, en mai 1981, pour le loimbricien *Nicodrilus velox* (Bouché 1967), par comparaison de l'endentère aux compositions des divers horizons par BOUCHE *et al.* (1983). Il est composé de 20 % de litière, de 14,2 % de l'horizon A1, 9,3 % de l'horizon A2, et de 2,5 % de l'horizon B, enfin de 53,9 % d'anciennes fèces déposées préalablement dans ces horizons. Après digestion, la matière organique est réduite de 46,4 %. De sorte que les parties minérales déposées proviennent après un ou plusieurs transits (recyclage) de 54,7 % de A1, 35,8 % de A2 et de 9,7 % de B, dont les profondeurs moyennes sont, dans cet exemple, respectivement 7 cm, 41 cm et 140 cm.

Une tonne (masse humide = 150 kg.m.s) de lombriciens anéciques remonte en conséquence 70 T/ha/an sur une hauteur moyenne pondérée de 32,1 cm soit un travail annuel effectué de 220 kJ/ha compensant le tassement. Ce mouvement représente également un phénomène d'antilessivage important ; dans le cas de cette étude la remontée annuelle d'éléments chimiques (exprimée sous forme d'oxyde) est de l'ordre de 10 500 kg de Si, 1 650 kg de Al, 628 kg de Fe, 80 kg de Mg, 47 kg de Mn, 522 kg de K, 98 kg de Ca, 120 kg de Na et 150 kg de Ti (extrapolation à l'année des analyses du mois de mai pour 1 tonne de lombriciens anéciques).

5. Transport extracorporel

Ce sont essentiellement les transports assurés par des êtres vivants jxir préhension, tel le travail des fourmis portant à leur nid les nourritures et débris nécessaires à leur société, tels les transports d'oiseaux construisant leur nid. Ces activités peuvent avoir des effets cumulés localement non négligeables.

Une autre modalité assez fréquente mais de portée plus limitée semble-t-il est le poussage effectué par divers animaux se frayant un passage (taupe, grillon-taupe,

vers de terre en milieu poreux...) ou transportant par rotation des éléments, tels les scarabées.

Enfin des excrétaux restant adhérents aux organismes (coquilles, phanères, épiderme mort, desquamaisons d'écorce, etc.) sont transportés et perdus çà et là par les organismes.

6. Transport corporel

Les êtres vivants mobiles transportent des éléments dans leur métabolisme constitutif et relâchent ceux-ci soit par excrétion (pertes de phanères, de mucus, ...) soit, par leur cadavérisation partielle (amputation, broutement, p. 224) ou complète (prédation, mort).

Ainsi nous avons pu incidemment, dans une expérience *in situ*, chiffrer l'ordre de grandeur d'un transfert vertical d'azote par les lombriciens anéciques. Ceux-ci utilisant leur nourriture, prise surtout en surface ou près de la surface, excrètent dans les galeries souterraines des produits azotés (mucus, ammoniacque et urée), après éventuellement minéralisation, dont une fraction est absorbée par les racines qui les remontent. C'est environ 630 kg d'N par an qui transitent ainsi à travers les métabolismes lombriciens dans une prairie (BOUCHE et FERRIERE, 1986).

7. Blocages corporels et statures biologiques

Les organismes font donc circuler au niveau cellulaire, mycélien, vasculaire, endentérien, extracorporel ou corporel les éléments des systèmes écologiques mais ils peuvent aussi contribuer au blocage temporaire de ces éléments par leur investissement en des compartiments relativement "stables" et dont la masse peut ne pas être négligeable.

C'est typiquement le cas des "squelettes" rigides permettant aux organismes une stature dans un milieu soumis à la pesanteur et à diverses forces mécaniques (mouvements, tel le vent et les courants).

Ces squelettes, peu développés dans les milieux hydriques où la pesanteur a peu d'effet, la densité des organismes étant proche de celle de l'eau, deviennent impressionnants dans les milieux terrestres émergés. Notamment les plantes ligneuses érigent leurs troncs, branches et feuilles grâce à des squelettes constitués de quantités considérables de carbone, de silice et d'eau. La quantité de carbone investie dans les squelettes de forêts peut représenter plus de 90 % du carbone de la biomasse et les quantités d'éléments minéraux, tel le calcium, accumulées en minéralomasses peuvent être 100 fois plus élevées en forêt qu'en cultures herbacées. Enfin, le calcium intervient souvent dans les composés relativement stables des cellules des plantes (pectate de calcium intercellulaire) et chez des animaux de groupes variés notamment dans les endosquelettes de vertébrés (poissons, batraciens, ...) et exosquelettes (crustacés, coquilles ...) avec du carbone (carbonate de calcium, etc.) plus ou moins pur (exosquelette de chitine : champignons, acariens...).

La stature des plantes et des animaux est enfin assurée par la turgescence aqueuse chez les champignons, les plantes herbacées ou chez les annélides. Chez ces derniers, l'eau constitue simultanément un remarquable moyen de transmission hydropneumatique des forces musculaires.

Ces blocages corporels durent parfois autant que l'organisme existe mais sont généralement renouvelés dans le métabolisme : il s'agit de blocage très relatif. Après la mort, ou après émanation, la nécromasse hérite de ces produits organiques qui peuvent séquestrer des éléments (tel l'azote des pigments bruns des feuilles mortes). Certains peuvent devenir relativement permanents, telles ceux des coquilles fossilifères.

Notons que de nombreux excrétaux restent adhérents à l'organisme vis-à-vis duquel ils jouent un rôle de protection (phanères, partie morte de l'épiderme et des exosquelettes, écorces d'arbres, coquilles). Ce sont alors des formes extracorporelles

bloquées d'origine biologique. Comme dans le cas précédent, il s'agit de nécromasses. Ces blocages extracorporels comprennent également les interceptions d'aérosols et d'eau qui peuvent être très importants en forêt (p. 122).

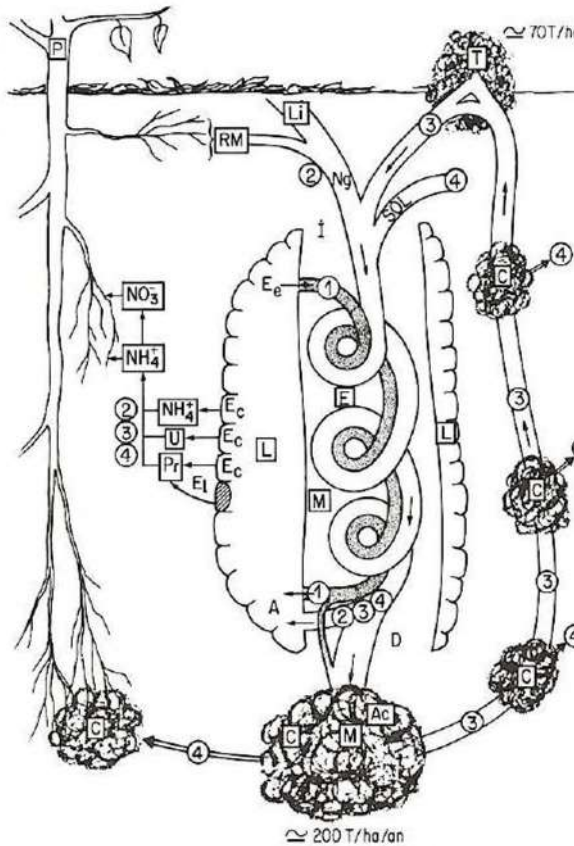


Figure 2-6 - Cycles pédobiologiques de transports
m i n é r a U s a l i o n - s t r a c t u r a t i o n .
L'ingestion (1) d'un lombricien se fait à partir des compartiments racines mortes (RM), litière (Li, turricules (Tl) et sol. La digestion est favorisée par des excréments endentériques, énergétiques et enzymatiques (Ee.) dont les éléments sont essentiellement réassimilés avec les assimilais issus d'ingestats, le reste étant déféqué (D). Au cours du transit dans l'endentère (E), la digestion s'effectue en synergie avec des microorganismes (M). Les éléments assimilés par le lombricien (L) sont recyclés dans le circuit court n°1 ou excrétés par voie cutanée et néphridiale (Ec) sous forme d'ammoniaque (NH₄⁺), de formes uréiques (U) et des mucoprotéines (Pr) des mucus. Les formes protéiques (Pr) proviennent également des (issus élaborés (El) émanés par amputation ou mort du lombricien. Ces divers émanais azotés aboutissent à des formes NH₄⁺ et NO₃⁻ assimilables par les plantes (P). Ainsi le cycle a "2 plantes-lombriciens-plantes est rapide. Les fèces riches en carbone (C), microorganismes, dont les actinomycètes (Ac), sont

déposées en surface en turricules (Tl) ou dans le sol et constituent des agrégats recyclés assez rapidement (cycle coprodigestif n°3, où alternent digestion externe et interne) ou plus lentement après accumulation dans le sol (cycle n°4) ce qui n'exclut pas l'exploitation par les racines des éléments minéralisés (d'après BOUCHE, sous presse). Les quantités se rapportent, au rôle de 1 T de lombriciens anéciques.

8. Télémétabolisme et activité biologique

Tous les organismes agissent sur leur milieu à "courte distance" par des actions télémétaboliques enzymatiques, osmotiques (suction de soluté), d'inhalation vers l'organisme, d'exhalation et d'excrétions aqueuses à potentialités acides ou basiques (voir 1° ci dessus).

Localement, au niveau de leurs organes d'échange les organismes agissent nécessairement en tant que sous-systèmes des systèmes écologiques (p. 76) issus de ceux-ci par sophistication.

À ce télémétabolisme primaire, ou fondamental, se superposent temporo-spatialement des activités sophistiquées de déplacement et d'action mécanique

particulièrement développées chez les animaux mais aussi chez les champignons et plantes vasculaires. Aux actions mécaniques liées au déplacement (Coulage), à l'ingestion (manducation) et aux triturations endentériennes, propres aux phagotrophes, s'ajoutent des actions complexes de modification du milieu (nids, terriers, élevages ou cultures). Par exemple, la culture de champignons par les fourmis *Alla* ou les termites, ou les hommes. La régulation de ces activités sophistiquées peut être décrite et mesurée. La figure 2-6 schématise quelques-unes de ces interactions lombriciens-microorganismes-plantes relatives aux structures et aux éléments C et N.

L'homme possède en propre ces deux niveaux d'actions métaboliques (fondamental et sophistiqué) auxquels il superpose des actes socio-économiques dont les motivations et la logique échappent à l'écologie et relèvent des sciences humaines (fig. 1-12, p. 104, 272).

2.3.7. Mouvements et blocages porosphériques

La porosphère est la partie de l'écosphère où la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère se rejoignent et se mêlent intimement (p. 118). Il s'agit essentiellement des sols en milieux émergés et des sédiments en milieux immergés sous eau douce ou marine. En milieux émergés, non continuellement glacés ou desséchés, c'est-à-dire hors des déserts glacés et secs, le sol est un système physique à trois phases hydrique, gazeuse et solide. Mais sa complexité est beaucoup plus grande encore : la phase solide inclut intimement des gaz et liquides, les solutions comportent intimement des suspensions, émulsions et gaz dissous et l'air est chargé usuellement à 100 % d'humidité relative d'eau, elle-même véhicule de solutés, etc.

Dans les sols la complexité physique des trois phases est maximale. La complexité biologique n'y est pas moindre, surtout si cette porosphère est couplée avec une biosphère active. À sa surface la photosynthèse permet une vie d'autant plus intense que la porosphère contient les éléments biogènes permettant cette vie, y compris l'eau. Réciproquement, la biomasse produit une nécromasse qui devient constitutive de la porosphère au point d'en être parfois la partie dominante. Les mouvements entre les trois phases sont dominés comme partout par des processus physiques :

- la gravitation des précipitations aqueuses qui traversent le sol en lessivant et en lixiviant les éléments dissous, solubles ou en suspension par hydrocinèses,
- l'évaporation des eaux en surface entraînant des remontées par capillarité du stock aqueux et le dépôt en surface des solutés non gazéifiés (dépôt de sels, remontée d'éléments biogènes, ...),
- les diffusions gazeuses vers l'atmosphère, les gaz résultant des réactions chimiques (incluant biochimiques) des sols,
- la cryoturbation provenant du travail physique résultant du changement d'état de l'eau sous l'effet des alternances froid-chaud (dilatation relative de la glace/eau liquide) amenant au déplacement relatif des éléments voire à leur transformation (roche s'emplissant d'eau puis éclatant : roche gelive),
- l'hydroturbation résultant de la dilatation d'éléments hydrophiles en présence d'eau et de leur rétraction en leur absence - très spectaculaire dans les sols argileux, dont les sols "tournent" sous cet effet (vertisols : les fentes de retrait résultant de la contraction de ces sols en période sèche, se remplissent de matériaux ; le sol remonte en période de dilatation hydrique du fait de ce remplissage),
- la bioturbation résultant de travaux "mécaniques" des organismes jouant d'ailleurs sur les faiblesses des forces physiques (racines) ou déplaçant les matériaux de façon généralisée (transport endentérien) ou localisés comme celui des termitières ou des vermières.

Dans les sols émergés humides à peu près 98 % des microorganismes y vivent, 80 % des animaux (en nombre et masse) et 30-90 % des végétaux (en masse), l'essentiel de la nécromasse s'y trouve ; les trois phases physiques contenant les deux états dipolaires (hydrophobes et hydrophiles) et mutuellement chargés des autres

phases y sont présentes : c'est le système (y compris les cinèses) évidemment le plus complexe.

La porosphère constitue un milieu en perpétuel remaniement mais elle présente également une relative stabilité par sa phase solide soumise toutefois aux cryo-, bio- et hydroturbations (et les travaux aratoires humains). Les remaniements à toute échelle (du profil de sol à la solubilisation moléculaire) constituent l'objet d'étude de la pédogenèse où s'entremêlent les phénomènes actuels (biophysicochimiques) de mobilisation et stabilisation d'éléments dépendant des conditions climatiques mais aussi biologiques (végétation, lombriciens, ...), entraînant des conséquences chimiques réactionnelles, physiques (érosions et dépôts, lessivages et accumulations) et microbiologiques de mouvements des éléments (voir pour la nécromasse, p. 139, 146). Ainsi la pédogenèse, ou développement des sols, est caractéristique des écosystèmes, car étroitement liée à ces réactions biophysicochimiques ; elle en est aussi la "mémoire" ou ["inertie" dans la mesure où les éléments relativement stables (solides) constituent l'un des innéats majeurs de ses systèmes et l'une des inerties les plus grandes lorsque d'un point de vue des utilisations de l'espace on cherche à modifier ces systèmes. Rien d'étonnant que la pédologie ait reçu l'une de ses impulsions majeures de la nécessité d'apprécier les terres (BOULAINÉ, 1985).

Les climats actuels marquent profondément le fonctionnement écosystémique (p. 109), donc la nature des sols, de sorte que les premières classifications pédologiques sont fondées sur cette zonalité pédoclimatique encore évidente (même en sols très remaniés par l'homme) telle l'acidification (voire podzolisation) dans les sols des climats froids, l'importance des encroûtements calcaires en climat méditerranéen, des dépôts de monmorillonite (une argile particulière : silicate alumino-ferrique) en climat sahélien, le développement des encroûtements ferrugineux (latérite) en climat tropical humide enfin, le développement des sols riches en kaolinites sous l'effet des conditions de lessivage important des régions équatoriales (MILLOT *et al.*, 1976). Ces systèmes biophysicochimiques sont soumis aux aléas climatiques incluant et modulant les sols de façon si nette que leurs innéats (de périodes antérieures) ou exnéats d'événements locaux (roches mères, alluvions, ...) ne jouent qu'un rôle partiel dans les caractéristiques des sols retenues par les pédologues (DUCHAUFOR, 1977).

'2.3.8. Mouvements verticaux : notion de pieu

Dans l'analyse ponctuelle, définie par BOUCHE (1975), que je préfère aujourd'hui appeler la procédure ponctuelle, les données issues d'une portion d'espace, sont intrapotées à un point théorique. Eventuellement ce point est temporospatialement commun à de nombreux prélèvements de forme et de dimensions variés ; il fait partie de l'intersection temporospatiale de tout prélèvement dont les données des caractéristiques sont rapportées au point. Ainsi, à la médiation temporospatiale près (imprécision due au fait qu'un prélèvement a une hétérogénéité interne et que la lecture ne reflète qu'une image d'ensemble du prélèvement), toutes les données d'un point sont temporospatialement corrélées (non statistiquement mais géométriquement) et sont donc rapportées à un espace-temps sans dimensions propres mais sont repérables grâce aux coordonnées (géographiques, dans la parcelle, et temporelles) : les prélèvements "perdent" leurs cotes (= limites temporospatiales) mais non leur situation (p. 277).

Par un processus analogue, les échanges de l'écosystème peuvent être rapportés à un pieu : segment de droite vertical à l'intérieur duquel les échanges et structures propres au système sont intrapolés à cet axe. Ce segment étant limité, en haut et en bas, aux compartiments faisant partie de l'écOSystème. Si les Cinèses propres à tout écosystème (pénétration de l'énergie lumineuse radiante, pesanteur, capillarité, etc.) sont ainsi conservées par l'intrapolation de données acquises, l'hétérogénéité spatiale horizontale des prélèvements séquentiels au pieu est "effacée" par la médiation spatiale.

Dans ces deux démarches d'intrapolation, le choix des cotes temporospatiales des prélèvements constitue une perte d'information par médiation à ne pas confondre avec celles dues aux techniques de mesure (p. 288).

L'écosystème échange avec son environnement (= entrée et sortie du système). Ces échanges peuvent constituer une de ses régulations (l'eau, le CO₂... comme facteurs limitants). Il est en outre régulé de "l'intérieur" par des facteurs d'ambiance (exemple : température, photopériode, granulométrie, codes génétiques, ...) qui sont des variables d'état.

L'adoption de la procédure ponctuelle et du pieu permettent d'affranchir intrinsèquement les études des écosystèmes des considérations d'extrapolation (ou d'interpolation) entre points (ou pieux) qui relèvent d'une procédure complémentaire distincte : celle de l'interpolation *versus* l'hétérogénéité temporospatiale, toujours présente. C'est la distinction entre le Processus Répétitif d'Accroissement des Connaissances systémique et le PRAC de comparaison typologique (p. 357) et de la complémentarité opérationnelle de ces deux processus (p. 424). Pour l'étude d'un écosystème comme pour la corrélation temporospatiale, la précision sera d'autant meilleure que les mesures seront effectuées avec une médiation minimale : cotes temporospatiales des prélèvements réduites au minimum nécessaire pour la lecture de la donnée). Ces aspects procéduraux seront décrits tout au long des chapitres ayant trait à l'élaboration écologique (2ème partie).

L'intrapolation temporospatiale est une opération classique intellectuellement inhabituelle à l'écologie et usuelle en mathématiques appliquées. Si nous possédons différentes valeurs de $y = f(x)$, on peut établir que, par exemple, la loi reliant y à x est de type $y = e^{ax}$ dont la fonction dérivée sera $y' = a \cdot e^{ax}$. Pour tout y on peut calculer une dérivée (par exemple, une vitesse si y est une distance et x un temps). Or cette vitesse à l'instant t n'est pas dépendante seulement de t mais de la fonction $y = f(x)$, c'est-à-dire des états avant et après t qui ont permis d'établir la fonction mathématique reliant y à x . Si l'on considère bien un "instant" (la durée tendant vers 0) on y intrapole les propriétés générales de la fonction $y \sim f(x)$, propriétés nullement instantanées. L'intrapolation à un point ou un pieu est un processus logique analogue dans lequel l'importance de la médiation est proportionnelle aux cotes.

Le pieu constitue donc une représentation d'un système écologique spatialement repéré mais ne prenant pas en compte l'hétérogénéité spatiale horizontale, gommée par la médiation. Par contre, le pieu conserve la structure verticale (les mouvements et blocages) de l'écosystème et est limité en haut et en bas comme l'écosphère. En effet, comme nous venons de le voir dans les paragraphes précédents la plupart des échanges énergétiques sont globalement verticaux. Le concept de pieu est sous-jacent à de nombreuses modélisations (p. 423) et constitue la limite géodésique minimale du concept d'écosystème, l'écosphère en étant la limite maximale (p. 193).

L'usage intuitif - mais exceptionnellement explicite - de la notion de pieu est très fréquente en écologie : par exemple, l'écosystème prairial de telle localité (au singulier) est bien opérationnellement un pieu.

Le pieu est un écosystème souvent étudié à l'état de subécosystème (échanges hydriques, échanges sédiimentaires, échanges du sol, etc.) et les pieux échangent entre pieux voisins (échanges horizontaux) dans le cadre de systèmes écologiques plus vastes (écorces), dépendant notamment des structures topographiques et microclimatiques (fig. 2-25, p. 194).

2.4. Organisations écosystémiques

Après avoir vu les constituants majeurs (p. 109) des compartiments des écosystèmes et les modalités des mouvements et blocages biophysicochimiques (p. 119), c'est-à-dire les composants systémiques, nous allons reprendre ces points sur la base de l'organisation qui en résulte pour un écosystème émergé terrestre. Nous partirons de la fixation chlorophyllienne (synthèse végétale) pour débiter les cycles qui seront décrits ensuite plus formellement pour l'énergétique et les cycles élémentaires (p. 156).

L'organisation littorale et marine ne sera évoquée que succinctement au paragraphe 2.4.5.

2.4.1. Synthèse végétale : organisation

Les bactéries photosynthétiques et chimiolithotrophes (p. 74), les algues et les plantes chlorophylliennes possèdent en commun la propriété de globalement réduire les éléments chimiques c'est-à-dire, à partir d'un état oxydé, de les faire passer à un état réduit par addition d'électrons : ces organismes sont écosystémiquement les producteurs.

Les producteurs (ou autotrophes) sont les métabolons dont les assimilais contiennent une énergie biochimique (liaisons covalentes oxydables par voies biologiques) inférieure à celle de leurs émanats.

Dans le milieu très oxydant de la biosphère (l'oxygène, le principal oxydant, représente 21 % de l'air) ces substances réduites, synthétisées par les producteurs, vont perdre graduellement des électrons par des chaînes d'oxydoréduction.

Un véritable "débit électronique" va ainsi des substances réduites vers des substances plus oxydées et cette différence de potentiel électronique constitue une force, les diverses réactions chimiques accompagnant ces oxydations étant nécessairement exergoniques. Cette différence de potentiel d'énergie biochimique est le moteur biophysicochimique des liaisons biochimiques de la matière des écosystèmes. Ce potentiel est usuellement exprimé en «Joules par gramme».

Ce courant d'électrons s'échange en réactions chimiques qui peuvent être très douces, quasi réversibles (dans les métabolismes de la biomasse) ou très violentes (oxydation par le feu).

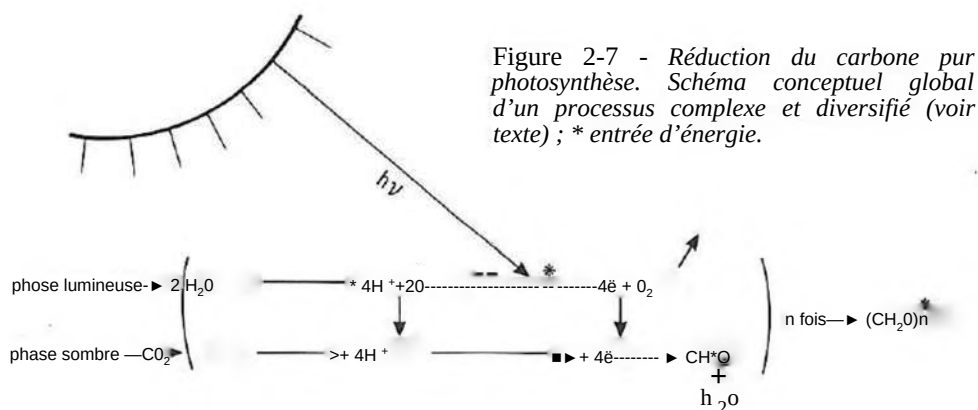
De toute façon cette réduction initiale - effectuée par des bactéries, protoctistes et plantes en formant, à partir de composés oxydés des composés organiques réduits - rechargent le stock des molécules biochimiques oxydables. Ces molécules oxydables par perte d'électrons constituent un potentiel énergétique biochimiquement (dans, ou hors, organismes) utilisable. C'est l'état de l'énergie biochimique, souvent approximativement exprimée en terme de carbone réduit.

Hormis le cas très particulier et quantitativement limité des chimiolithotrophes, c'est très largement la fonction chlorophyllienne qui va former, à partir de l'eau et du gaz carbonique, du carbone réduit (en carbohydrates), l'oxygène servant d'oxydant (fig. 2-7).

Celle fixation chlorophyllienne est chimiquement une réaction endergonique c'est-à-dire une entrée d'énergie (*) qui globalement permet le déplacement des électrons de l'oxygène réduit de l'eau pour le ramener à l'état d'oxydant (oxygène (>2) et conjointement réduire le carbone oxydé (CO_2) en carbone réduit ($\text{C}^{4'}$) susceptible de rentrer dans de nombreuses réactions chimiques. Ces réactions biochimiques dépendent de l'organisation moléculaire des organismes (biologie moléculaire) et des transits inter-métabolons de l'abios. L'ensemble des processus de fonctionnement des individus étant l'objet de la physiologie.

L'écologue n'étudiant que les relations des organismes avec leur environnement s'intéressera à l'échange global organisme—"milieu. Les plantes inhalent, essentiellement par les feuilles (stomates), les formes gazeuses, ici le CO_2 , et sont pénétrées par l'énergie radiative lumineuse qui, dans le domaine du visible, crée des réactions photochimiques d'excitation électronique sur des molécules réagissant à certaines longueurs d'onde des photons (p. 55) et de ce fait ont des couleurs apparentes leur valant le nom de pigments.

Ces pigments transmettent leur énergie à l'un d'entre eux, la chlorophylle (dont il y a plusieurs variantes), permettant la fixation chlorophyllienne (l'assimilation chlorophyllienne) par photosynthèse de molécules composées de carbone réduit (fig. 2-7). L'eau nécessaire est puisée usuellement dans le sol par le système racinaire de sorte que les composés organiques seront essentiellement des synthétats de carbone réduits et d'eau liée par énergie chimique grâce à cette réaction photochimique. L'oxygène gazeux est émané essentiellement par exhalaison foliaire (stomates). Le processus global de la photosynthèse est très complexe, non encore totalement compris, et fait intervenir une centaine d'étapes réactionnelles chez les plantes supérieures.



Il est important de noter que, comme toutes réactions de poïkilothermes, celles-ci sont sensibles à la température mais qu'en outre, elles dépendent des radiations lumineuses (spectre d'absorption). Ces radiations pourront être facteurs limitants, non seulement dans le sol opaque mais aussi dans l'eau et l'atmosphère en raison des interceptions physiques (nuages, Lurbidités des eaux) et biologiques par les couverts végétaux dans les suspensions aqueuses des lacs et eaux salées. Dans l'atmosphère les plantes érigées ont une stratification verticale (herbacées, arbustes, arbres) souvent caractéristique, et une orientation foliaire optimisant cette interception biologique.

Les plantes doivent "traiter" un volume énorme d'air pour en extraire le gaz carbonique. L'air contient en général 3 pour mille de CO_2 , un végétal ne tire que 3 l de CO_2 par m^3 soit 36,5 mg de carbone. La synthèse de 1 g de carbone en matière organique végétale oblige donc au traitement de 27,4 nv d'air (avec un rendement de 100 %). Pour faire cela, les végétaux développent un système "respiratoire" foliaire considérable interceptant lumière et CO_2 mais exposant les tissus à une forte évaporation.

L'assimilation de ce CO_2 se fait via des stomates foliaires et des vacuités gazeuses par diffusion dans le système biologique nécessairement hydraté (p. 75). Celui-ci peut perdre de l'eau par évapotranspiration ; les stomates foliaires se ferment si la fourniture hydrique racinaire est insuffisante.

La plante se présente en effet comme une pompe hydrostatique puisant dans le sol l'eau (et sélectivement les solutés) et perdant cette eau par évapotranspiration (les feuilles peuvent physiquement éliminer l'eau en excès* par sudation) mais, si l'eau vient à manquer, les stomates se ferment et coupent ainsi l'arrivée de CO_2 . L'architecture végétale, l'orientation foliaire vis-à-vis des rayonnements thermolumineux, la physiologie stomatique, la disposition des chloroplastes constituent un compromis fonctionnel ayant éprouvé de très nombreuses modalités qui expliquent en partie la diversité du monde végétal sous contraintes atmoclimatiques et pédoclimatiques différentes.

Pour les végétaux, les contraintes sont, dans l'atmosphère, essentiellement lumineuses, thermiques et de concentration en CO_2 , et, dans le sol, sont surtout hydriques et en phytonutriments.

Les plantes ne font pas que réduire le carbone par un jeu de trois éléments chimiques (C, H, O), leur organisation vitale implique un métabolisme très complexe, où, grâce à cette énergie, elles pourront par dégradation oxydative, synthétiser de nombreuses molécules nécessaires à leur fonctionnement (protéines, ADN, ATP) et à leur structure squelettique (surtout développée en milieu terrestre : cellulose, lignine, ... p. 128).

Elles assimilent essentiellement (mais pas exclusivement) des éléments chimiques biogènes (tableau 2-1) sous forme oxydée qu'elles ré-introduisent ainsi dans des molécules organiques sous forme réduite. Les divers éléments chimiques sont ainsi organiques (p. 79).

Les éléments minéraux sont assimilés sous forme généralement hydrosoluble par les racines et gazeuse par les feuilles (CO_2 , NH_3) et sont émanés sous forme d'élaborats (tissus), d'excrétats (exsudats foliaires, racinaires) ou d'exhalaisons gazeuses (CO_2 , O_2 , H_2O). C'est au niveau des producteurs que l'on parlera d'organisation des éléments chimiques. Au niveau des consommateurs et des réactions extrabiologiques, qui oxydent les molécules organiques, il y a globalement libération d'éléments chimiques simples oxydés qui pourront être repris par les consommateurs. Toutefois, temporairement certains éléments minéraux peuvent être organiques par des consommateurs, on parle alors de réorganisation (par exemple, les bactéries, utilisant des substrats carbonés très riches, puiseront de l'azote ammoniacale NH_4^+ dans le milieu).

Au cours de l'évolution, ayant conduit à la variété actuelle des producteurs, diverses modalités de la fixation chlorophyllienne se sont développées et intéressent l'écologue dans la mesure où les rendements de réduction du carbone (de formation de biomasse végétale) peuvent différer sensiblement. Ces diverses modalités conduisent à des adaptations végétales très remarquables et à des processus photochimiques suffisamment différents pour permettre une ségrégation isotopique des éléments chimiques et notamment du carbone.

Il sort du cadre de cet ouvrage, et de l'objet de l'écologie, de détailler ces mécanismes métaboliques mais leurs différences conduisent à deux conséquences pratiques :

1) des adaptations aux contraintes lumière-température-eau différentes; d'où des rendements d'énergie photonique incidente U_i à l'énergie biochimique fixée U_b variant de $U_b = 1$ ou 2 % de U_i (fig. 2-17, p. 162),

2) une ségrégation différentielle des carbones ^{12}C et ^{13}C , suffisamment sensible pour être détectée en termes de δC , et ayant une importance technique opérationnelle pour la mesure des cinèses du carbone dans les écosystèmes, (p. 54).

Le processus global de la photosynthèse chez les plantes supérieures comporte, comme déjà indiqué, une centaine d'étapes réactionnelles qui peuvent être divisées commodément en une phase lumineuse (apport des photons et excitation électronique dissociant l'eau en hydrogène et oxygène) puis en une phase obscure où l'hydrogène réduit (= proton H^+) sert à réduire le CO_2 (fig. 2-7).

1) Les plantes en C₃ ont une photosynthèse aboutissant à deux molécules de 3 carbones (phosphoglycerate) pouvant synthétiser un sucre à 6 carbones (ribulose-1-5 biphosphate) sous l'action d'un enzyme particulier (le Ribulose-1-5 biphosphate carboxylase/oxygenase ou RubisCo). Mais la catalyse de RubisCo est réversible et est susceptible en fonction des concentrations en CO₂ et O₂ de la cellule (donc indirectement de l'atmosphère) de catalyser la dégradation de ce composé réducteur c'est-à-dire son oxydation en CO₂ et H₂O (c'est alors la photorespiration). Il y a, dans ce cas, une balance entre photorespiration et photosynthèse.

2) Les plantes en C₄ au contraire, grâce à une organisation spatiale des chloroplastes et à de nouvelles fonctions passant par un corps à 4 carbones (l'oxalo-acétate), placent la fonction du RubisCo en condition de forte concentration de CO₂ donc exclusivement de photosynthèse, et ceci même en faible concentration atmosphérique de CO₂. Ce sont surtout les plantes d'origine tropicale (strates végétales très actives, compétitrices pour le CO₂, ?) qui possèdent ces attributs. Certaines comme le maïs, le sorgho, sont aujourd'hui cultivées en milieu tempéré et peuvent dans certains cas être mises à profit comme source carbonée marquée par un fort déficit en carbone lourd (p. 274). En effet la structure cellulaire complexe des plantes en C₄ (échanges à chloroplastes multiples en couronne ou kranz) entraîne une ségrégation diminuant "fortement" les carbones lourds (¹³C notamment) par rapport aux proportions atmosphériques de référence (cf. deltaC, p. 54).

3) Les plantes CAM (Crassulacean Acide Metabolism = métabolisme acide des crassulacées ou plantes grasses). Ces plantes vivent en conditions hydriques limitant les échanges extérieurs (pertes d'eau) d'où une faible concentration de CO₂ interne. Le système, fonctionnant à faible concentration de CO₂, est semblable aux plantes en C₄, mais en outre l'ouverture des stomates, quand elle est possible, est nocturne (baisse de température, humidité relative temporairement élevée, rosée) de sorte que la phase lumineuse est diurne et que la phase obscure (fixation de CO₂) est nocturne. (Ces deux phases sont concomitantes, donc diurnes, chez les plantes en C₃ et C₄).

Dernier point essentiel, le processus de photosynthèse, globalement résumé figure 2-7, fait ressortir que la réduction s'accompagne de la formation temporaire de protons donc d'acides, ceux-ci liés aux molécules seront chimiquement neutres, mais tout au long des réactions d'oxydation dégradatrices, cette fonction acide sera libérée dans le milieu. Au plan des équilibres protoniques, la réduction chlorophyllienne "alcalinise" le milieu et crée un potentiel biologique acide s'exprimant lors de la décomposition (p. 125).

2.4.2. Emanations végétales

La matière organique quitte le compartiment végétal par trois voies et deux niveaux :

- 1) l'herbivorie ou mort provoquée par exnèats biolytiques,
- 2) la nécrose ou mort des tissus par innèats,
- 3) l'excrétion d'exsudats foliaires, racinaires, floraux, ...

Enfin deux niveaux sont distingués : la partie aérienne et la partie racinaire.

La production de tissus élaborés effectivement libérés par les plantes est très largement inconnue. La plupart des estimations sont fondées sur des comparaisons d'état considérant que la différence entre la biomasse minimale et maximale constitue la masse de tissus produits (p. 166). C'est confondre les débits réels avec de simples différences d'état (confondre transformation avec cinèse, p. 46, 502).

Des estimations probablement plus précises ont été obtenues pour la production aérienne des arbres. Malheureusement, nous connaissons très mal quantitativement l'émanation racinaire.

Les mécanismes liés à cette émanation peuvent être regardés comme des processus sous contrôle du végétal telles les exhalaisons gazeuses, les excrétaux qui semblent parfois liés à des interactions hétérotypiques issues d'une co-évolution (p.

225) telle la production de nectars, de parfums ou d'exsudats racinaires (qui influencent les organismes environnants). De même les élaborations (émanations de tissus élaborés) sont parfois sous contrôle végétal (sénescence des tissus), même lorsque la plante semble subir l'agression d'un prédateur consommant par exemple des fruits mais assurant, en fait, la dispersion des semences (p. 229). L'action des biolytiques (herbivores) n'est pas nécessairement "négative" vis-à-vis de la plante, même en cas de consommation d'organes végétatifs, notamment en levant l'auto-compétition (p. 228), pour la lumière par exemple, des organes sénescents vis-à-vis d'organes plus jeunes. D'un point de vue systémique, les biolytiques accélèrent les Cinèses (émanations) mais peuvent, par l'excès de leur action, détruire leur source nutritionnelle.

2.4.3. Stockages et cinèses endogées

1. Processus

La nécromasse libérée par les végétaux parvient au sol selon les voies d'émanation végétale décrite au paragraphe 2.4.2. Il faut y ajouter les émanats des animaux biolytiques épigés contribuant également à la nécromasse par des produits élaborés (cadavres, phanères, ...) et des excréments (urines, ...). Cette contribution, via les biolytiques non terricoles, aboutit au sol sous forme de litière, ou est solubilisée ou sédimentée en milieu aqueux.

Dans le sol, la nécromasse va être globalement minéralisée, c'est-à-dire va être décomposée par oxydation des composés carbonés (aboutissant au CO₂) et par production de petites molécules, souvent ionisées, assimilables par les plantes (NO₃⁻, K⁺, ...). Ces molécules sont dites minérales en raison de leur perte de liaisons carbonées au cours de la minéralisation ; les phytonutriments ne correspondent pas à toutes les formes minéralisées des éléments chimiques mais seulement à celles assimilables.

Mais ce processus global passe par de nombreuses modalités. D'abord un ensemble d'organismes va attaquer cette nécromasse pour en tirer leur énergie, eux-mêmes étant consommés par certains biolytiques (p. 223). Cette attaque se faisant en général par libération d'exo-enzymes lysant pour partie la nécromasse et par fractionnement mécanique de celle-ci (animaux) puis après assimilation par catabolisme (p. 79, 157). Ces organismes à leur tour libèrent des éléments minéralisés et des émanais.

Les microorganismes produisent des exo-enzymes qui décomposent de nombreux polymères : cellulose, amidon, pectine, chitine, lignine, protéines, peptides, acides nucléiques, etc. Les animaux sont moins richement pourvus en exo-enzymes et excrètent ceux-ci dans leur tube digestif où, très souvent en association avec les microorganismes, s'y effectue le travail mécanique et biochimique de lyse des polymères organiques.

En fait, dans le sol, les actions animaux-bactéries-champignons sont souvent successives. Il y a alternance des interventions répétitives des organismes sur la nécromasse dont les polymères sont peu à peu dégradés en monomères assimilables. D'autres fractions, dénaturées, ne peuvent être lysées par voie enzymatique, mais seulement chimique et tendent à s'accumuler en raison d'une décomposition lente (lignine, humus complexes) (p. 139). L'âge moyen de la nécromasse nous indique relativement la proportion et la durée des formes peu dégradables d'un sol.

En outre, la nécromasse, dans ces divers états, va être le siège de réactions physicochimiques de natures variées, globalement exergoniques, conduisant à des polymérisations, à des liaisons organominérales où les minéraux sont constitutifs du sol, non assimilables par les plantes (limons, argiles, sables, ...) et très riches en silice et en aluminium.

La nécromasse se décompose donc globalement mais de façon très complexe et diversifiée. Au cours de cette évolution des produits, soit organiques soit organo-minéraux, se forment et deviennent très résistants à la décomposition par divers mécanismes :

1) un processus sélectif : les matières les plus labiles partant les premières, il reste les matériaux résistants. Or, les végétaux notamment élaborent des matériaux "résistants" à l'attaque de nombreux organismes tels la lignine et les pigments bruns,

2) un processus de dilution-protection dans la strate minérale : c'est la séquestration. Au niveau moléculaire, la probabilité de rencontre du site actif d'un enzyme avec le site hydrolysable correspondant de la nécromasse est d'autant plus faible que cette nécromasse est dispersée dans la masse minérale ; au niveau micrométrique, le mélange des matières organiques et minérales, résultant du brassage intestinal des lombriciens anéciques, écarte les autres macrophages de la nécromasse (fig. 2-6, p. 129),

3) un processus d'appauvrissement énergétique. La nécromasse a de moins en moins d'éléments carbonés ou de liaisons chimio-énergétiques accessibles et ne permet plus l'activité des organismes libérant les exo-enzymes : localement l'énergie biochimique (p. 79) ne permet plus à la machine écosystémique de tourner,

4) un processus de dénaturation organique. De nombreuses réactions physicochimiques non biologiques entre molécules organiques ou/et avec les éléments minéraux créent des molécules formées de façon "aléatoires" selon des liaisons très diversifiées à faible probabilité d'occurrence pour chacune. A l'ordre des synthèses biologiques produisant des composés relativement standards lysables par des enzymes spécifiques se substitue le désordre de locus très divers où l'activité enzymatique devient quasi inopérante sur des matières carbonées n'ayant plus qu'un lointain rapport avec leur origine biologique.

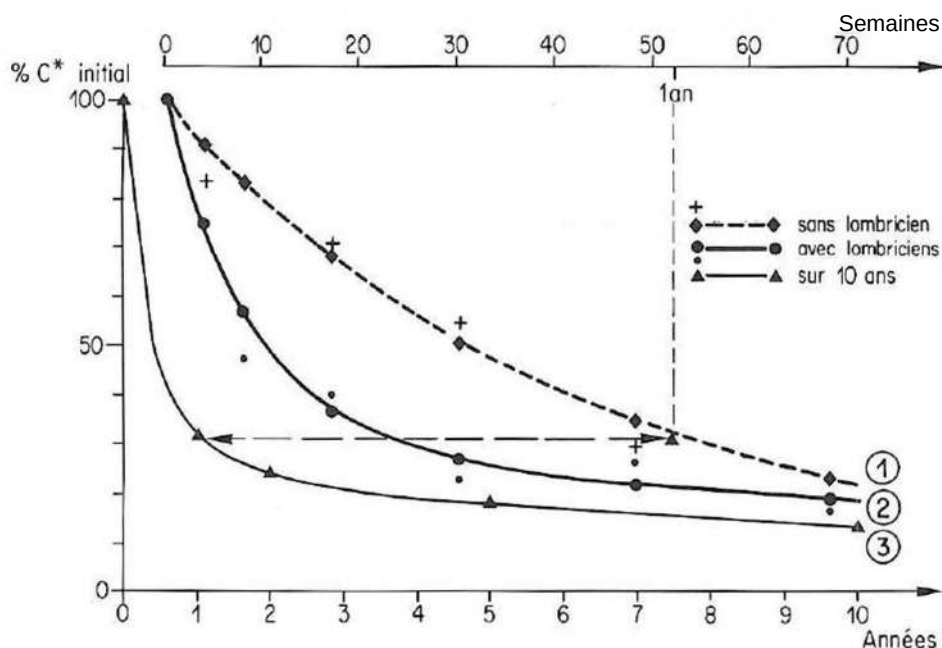


Figure 2-8 - Décomposition d'une litière herbacée de *Lolium perenne* (Ray Grass). Observation, pendant 72 semaines, en absence (1) et présence (2) de l'action lombricienne d'un anécique d'après DIETE (1979) réinterprété (BOUCHE et al., 1987), sur 10 ans (d'après JENKINSON, 1077) et dans un soi agricole (3) (cf. fig. 2-12).

Celle évolution de la nécromasse est appelée humification. Elle conduit à toute une succession de produits humiques de stabilité croissante qui peut s'observer de diverses manières dont celle de l'âge moyen de la nécromasse mesurable par la datation au ^{14}C . La logique mathématique d'interprétation des cinèses d'échange global est développée page 410, regardons ici les processus.

La nécromasse "fraîche" (= récemment émanée) se décompose en libérant des phytonutriments et en formant des composés "résistants" (humus) qui néanmoins finissent par se décomposer en suivant une asymptote (fig. 2-8). Les phytonutriments peuvent être réutilisés par les producteurs (organisation) ou par les autres organismes (réorganisation). Les microorganismes particulièrement réutilisent d'autant plus de phytonutriments qu'ils dégradent (= tirent leur énergie) de matières organiques assimilables (= labiles) abondantes.

Le système est alors pour certains éléments quasiment fermé. Par exemple, pour l'azote, les nécromasses végétales fraîches sont souvent pauvres en azote (ou encore l'azote est séquestré dans des molécules peu dégradables tels les tanins et les chitines). Lorsque la proportion Carbone/Azote de la nécromasse est élevée (= 150 à 30) tout l'azote minéralisé, en raison de sa carence relative, est repris par les microorganismes. Les plantes ne disposent alors pas des phytonutriments (ici l'azote). Toutefois avec le temps, le départ du CO_2 modifie le rapport C/N qui décroît et se rapproche des besoins "à l'équilibre" des microorganismes (vers C/N = 8). A un certain stade (vers C/N = 20), les microorganismes lysent les substrats assimilables et par catabolisme libèrent des phytonutriments qui ne leur sont plus nécessaires. Ces phytonutriments tendent alors à s'accumuler dans le sol, à être assimilés par les plantes ou à être lixiviés (p. 164) (fig. 2-9).

2. Les transferts de phytonutriments

Comme déjà indiqué, la minéralisation-humification libère les phytonutriments réassimilés par les plantes avant de revenir en nécromasse (notion de cycle, p. 164) ou encore transitoirement incorporés dans les décomposeurs, et particulièrement les microorganismes, mais peut-être aussi les lombriciens (pompe NH_4^+ pour le contrôle du pH, Bouche *et al.*, 1982).

Rappelons que le paradoxe systémique (p. 45) conduit à la conclusion que plus un état est labile, plus il est transitoire dans les cycles et moins il participe aux grands compartiments. En terme de cinèse endogée, cela s'applique évidemment et conduit à des compartiments de phytonutriments fonctionnellement importants mais quantitativement virtuels. Ces phytonutriments sont hydrosolubles, certains peuvent en conditions réductrices ou oxydantes constituer pour les microorganismes des accepteurs ou fournisseurs d'électrons en changeant de niveau d'oxydation (p. 175). Enfin, étant souvent sous forme ionique, ils peuvent être échangés sur le système physique en tant que charge notamment sur les échangeurs à grande surface que sont les argiles ou les humus. Ces formes peuvent donc être adsorbées (chélation, échanges ioniques) ou quitter le sol local par lixiviation (cas de K^+ , de NO_3^-) ou par volatilisation $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NH}_3 + \text{H}^+$ ou réduction en forme gazeuse N_2 (fig. 2-9).

3. La nécromasse : volant (statique) et dynamique (cinèse) des écosystèmes

Les humus issus de la nécromasse sont, en fonction du temps, quantitativement de plus en plus réduits et de plus en plus stables. Ils font partie dans leur ensemble de la nécromasse totale et constituent un état physique du sol par leur accumulation et leur liaison organo-minérale.

Mais le compartiment nécromasse global comporte des substances peu humifiées (nécromasse récente) et tous les intermédiaires avec des formes très humifiées, ce qui influe sur les propriétés chimiques et physiques des sols.

Tantôt il y a une bonne humification, c'est-à-dire une transformation rapide des débris végétaux en produit humifié (minéralisation primaire), tantôt il y a une bonne minéralisation finale (= secondaire) des produits humifiés, tantôt il y a les deux.

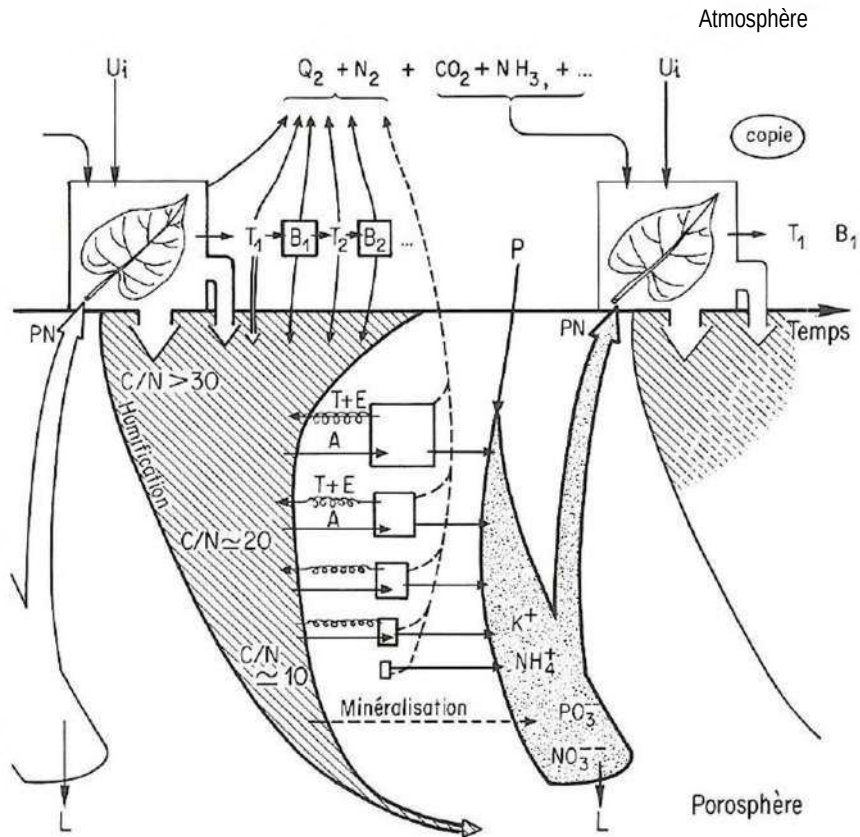


Figure 2-9 - Cycles tropho-énergétiques. Les produits organiques formés par les plantes (réduction du CO_2 grâce à l'énergie photonique U_i et combinaison avec les phytonutriments : PN) sont émanés par exsudais, litière, pétales, ... mais aussi par les prélèvements des herbivores (B_1) eux-mêmes subissant des biolytiques (B_2)... Bn. Chaque transit extra-métabolite de la nécromasse (T , T_h , T_h^Δ , ... T_n , comme les dégradations intra-organismes, libère le carbone oxydé, certains gaz (N_2 , NH_3 , ...), l'énergie dégradée (Q) et les phytonutriments. Ces derniers peuvent être lixiviés (L), enrichis par les précipitations (P), et assimilés par les plantes au temps suivant. Les décomposeurs, outre les herbivores et carnivores, comportent des organismes nécrolytiques assurant des actions télé-métaboliques par enzymes (E), broyages, pH , ... et des émanations ($T + E$) et des assimilations (A) amplifiant la minéralisation.

L'état de la nécromasse globale résulte :

- des modalités d'entrée-sortie du compartiment nécromasse,
- des modalités de transformation - humification dans ce compartiment,
- des degrés de liaison et de brassage intime de la matière minérale avec la nécromasse.

Les propriétés physiques et chimiques des sols, conditionnant largement la fertilité des écosystèmes, dépendent des formes de la nécromasse et des liens organismes-nécromasses et nécromasses-minéraux (fig. 1-6, p. 64).

L'entrée-sortie, c'est-à-dire le temps moyen de résidence, dépend des conditions de Cinétique physicochimique : une température et une humidité importantes accélérant potentiellement l'ensemble des échanges de l'écosystème. Les activités biologiques respectent ces règles, car elles sont étroitement inféodées au pédoclimat. Pratiquement tous les organismes endogés sont thermiquement et hydriquement synchrones (= poïkilothermes et poïkilohydriques). En outre, ces organismes dépendent globalement des éventuelles carences en éléments biogènes.

Lorsque les conditions sont optimales, l'accumulation de nécromasse dans les sols est faible (quelques pourcents de carbone organique). Ceci se produit dans les sols équatoriaux ou/et tropicaux (saison humide). Les végétaux se décomposent activement dès la partie aérienne dans la strate arborée ou herbacée. L'humidité, la température et l'aération atmosphériques réunissent les conditions d'une décomposition-humification sur la partie aérienne des végétaux, avec entraînement gravitaire des éléments au fur et à mesure qu'ils se détachent de leur support végétal. Des sols organiques perchés se forment sur les plantes (sols épiphytes) et contiennent un système complet de microorganismes et d'animaux (oligochètes, collembolles, acariens, ...).

Toutefois, les produits végétaux "résistants" (lignifiés) peuvent être localement accumulés et attaqués par des organismes spécialisés (termites et champignons lignivores plus ou moins associés, TOUT AIN, 1984).

En conditions à saisons contrastées (tempérées, tropicales), la saison difficile marque un arrêt de végétation. A l'entrée de celle-ci il y a émanation importante d'organes végétaux physiologiquement inadaptés à la mauvaise saison. Cette importante nécromasse peut se conserver à l'état sec à la surface du (ou dans le) sol, les processus biologiques et les réactions physicochimiques (faute du solvant eau) étant suspendues ou très ralenties (saison sèche). En conditions atmosphériques froides et humides (hiver en climat tempéré), la présence ou l'absence de lombriciens anéciques est particulièrement déterminante. Ceux-ci, en enfouissant la matière organique, accélèrent la dégradation en permettant deux changements d'état simultanés :

1) le passage d'un atmoclimat froid à un pédoclimat tamponné et chaud (surtout à l'automne) (fig. 2-1, p. 112). Les écarts thermiques et hydriques nycthéraux prévalant à la surface, étant tamponnés dans le sol, ne constituent plus une contrainte pour l'activité macro- et microbiologique,

2) le mélange organominéral. Les lombriciens brassent en concassant la litière avec le substrat, minéral (des sables fins aux argiles).

Dans les climats subdésertiques secs ou glacés, ou encore dans les milieux à carence d'éléments biogènes marqués (landes), les plantes deviennent avant tout des "résistantes" (p. 245). Ne pouvant compenser par une croissance active les pertes par herbivorie, elles sont constituées pour résister aux consommateurs biolytiques et libèrent surtout des émanais résistants aux attaques des consommateurs même "décomposeurs", ce qui se reflète par l'accumulation de la nécromasse.

Il résulte de ces ensembles fonctionnels des états moyens de la matière organique morte qui peuvent être décrits aux plans morphologique, chimique, physique et biologique.

L'état global des nécromasses est classiquement référé aux types d'humus proposés par MULLER (1878, 1884) et depuis constamment perfectionnés. Ces types d'humus décrivent l'état de la nécromasse et sa liaison avec la lithosphère dans la porosphère.

Le mull est caractérisé par des litières (dépôts de débris végétaux sur le sol, surtout feuilles mortes), à existence courte (moins d'un an en moyenne), et une activité de lombriciens mêlant l'organique au minéral. Ce mull est opposé au type d'humus à accumulation organique de litière non mêlée au minéral (horizon Ao, holorganique) et à décomposition lente appelée mor. En fait, les stations à mor de

Muller comportaient des lombriciens épigés (BORNEBUSCH, 1930) d'activité pédogénétique non caractéristique (pas de mélange organo-minéral). Ce classement initial a été complété et nuancé.

Les mulls actifs à lombriciens anéciques où la litière est de durée très brève (fig. 2-12, p. 149). En prairie l'éradication totale de la végétation (par herbicides) permet de voir disparaître l'ensemble des débris végétaux (aériens et souterrains) en une seule "saison froide" (automne-printemps). Les litières sont dans leur ensemble consommées en saison froide (à l'exception des feuilles ne parvenant pas au sol). Il y a donc au plus une couche L (= litière transitoire) ; pas d'horizon H ; un horizon discontinu de turricules (fèces des anéciques) ; un horizon Al formé de grumeaux organo-minéraux (= ièces récentes d'anéciques et d'endogés) et d'agréats organo-minéraux stables issus du mélange initial litière-minéraux (p. 138). Al est un horizon coprogène organo-minéral.

Ces mulls se différencient 1°) en mulls acides des milieux pauvres en cations bivalents relativement lixiviés en climat tempéré où la minéralisation secondaire est active et où l'horizon Al limité est peu organique, 2°) en mulls acides des milieux à climat sec et froid (continentaux) où la décomposition secondaire des humus étant plus lente l'horizon Al est plus organique et plus développé et 3°) en mulls carbonates où les litières ont parfois une durée un peu plus grande (milieu à pédoclimat sec) mais surtout où les humus, à minéralisation secondaire lente, s'accumulent dans un horizon Al développé. Les deux "organismes efficaces" (TOUTAIN, 1981) de ces humus sont les lombriciens et les pourritures blanches (champignons). Ces mulls, particulièrement en milieu forestier à sol moyennement argileux, contiennent des associations argile-fer-humus, relativement résistantes évitant ou limitant le lessivage et conduisant à une insolubilisation du matériel organique.

Les mulls andiques, développés sur cendres volcaniques, séquestrent les humus évolués dans un horizon Al qui peut contenir 20 à 30 % de matière organique.

Les mulls à champignons ont une activité dégradatrice intense entraînant une morphologie L-Al de type mull mais sans agrégats coprogènes organo-minéraux (TOUTAIN, 1981).

Les moders présentent une absence de mélange organo-minéral (activité lombricienne anécique nulle et endogée limitée). Des animaux (enchytraeides, collemboles, acariens, larves de diptères, ...) et des champignons inférieurs consomment la litière ce qui entraîne la formation d'une couche H coprogène holorganique (= non minéral). Un faible horizon Al organo-minéral existe sous ces moders : la matière organique y est composée de boulettes fécales très stables.

Les mors se caractérisent par une accumulation de matière organique en surface en raison d'une humification primaire lente et sans brassage mécanique animal important, seuls les lombriciens épigés (en petit nombre), les enchytraeides, acariens et collemboles y ont une activité modérée dans l'horizon holorganique qui est différenciée de haut en bas en litière abondante (L), en débris semi décomposés (F) et en un horizon holorganique sans structure macroscopique (H). La matière organique entraînée par lessivage développe un faible horizon organo-minéral Al sans structures coprogènes marquées. Relativement acide (p. 125, 136), cette matière organique forme des complexes avec l'aluminium et le fer des minéraux. Dans les sols podzolisés, ces complexes solubles migrent vers les horizons profonds où ils forment des couches d'accumulation caractéristiques, parfois indurées et étanches (alios).

La tourbe est un type d'humus dont la décomposition primaire est également bloquée en anaérobiose permanente (constamment immergée) et milieu appauvri, notamment par blocage des éléments biogènes dans cette nécromasse.

Les aninors sont des humus périodiquement immergés et subissant des phases saisonnières d'anaérobiose et d'aérobiose. En immersion, se développent des fermentations anaérobies, avec production de méthane, sulfures, etc., en émergence, ces humus fonctionnent comme des hydromulls, avec forte activité de vers de terre anéciques (LOUSTAU, 1984).

Des types bifonctionnels en mosaïque s'observent par exemple lorsqu'une plante très résistante (p. 245) produisant une litière inappétante pour les anéciques locaux, tels les conifères dans les Alpes, induit un moder et que, simultanément, une végétation intercalaire de sous-bois beaucoup plus labile permet l'activité des anéciques formant par taches un mull.

Remarquons que les types d'humus constituent une approche morphofonctionnelle relativement holistique de la matière organique (surtout nécromasse, mais aussi en partie biomasse). Elle permet d'y rattacher des études purement morphologiques d'état des profils de sols (distributions verticales visibles des états de la matière organique), des travaux d'analyse chimique, des études de micromorphologie ou de biologie des sols.

11 s'agit en l'état actuel surtout d'études morpho-fonctionnelles (p. 47) fondées sur des méthodes morphologiques (à des échelles d'observation allant du microscope électronique à transmission à l'étude métrique d'une coupe verticale de sol = profil) et des méthodes chimiques et biochimiques d'analyse de diverses fractions organominérales de l'association nécromasse-cheradomasse plus ou moins étroite de ces fractions. Son apport à la caractérisation des écosystèmes n'est pas négligeable (DUCHAUFOR et TOUTAIN, 1985).

Différentes méthodes d'analyse ont cherché à compartimentaliser les molécules organiques mortes à partir des structures auxquelles elles sont rattachées (tamisage des matériaux organiques), du mode de liaison organo-minéral, du type de molécules (familles moléculaires aliphatiques ou aromatiques, par exemple) auxquels se rattachent ces composés organiques d'origine biologique mais aussi chimique (réactions extrabiologiques, de polymérisation ou condensation notamment) interférant avec le milieu chimique du sol : pH, cations, etc.). D'importants progrès portant sur les compartiments de nécromasse et leur signification dynamique sont en cours grâce au rapprochement des méthodes analytiques et de marquage isotopique (JOCTEUR MONROZIER et DUCHAUFOR, 1988).

Diverses classifications morphofonctionnelles des humus ont été proposées ; celles-ci tiennent forcément compte des climats, des constituants biologiques notamment des classements morphofonctionnels des plantes (DELECOUR, 1980), voire des lombriciens (TOUTAIN, 1981).

Ces concepts sont d'usage encore restreint en raison de leur lente émergence à partir de différentes approches complémentaires, souvent très analytiques et d'adéquation mutuelle imparfaite. Les meilleurs travaux sont souvent anciens ou, s'ils sont modernes, sont analytiques et restreints à des domaines particuliers (humus forestiers notamment). L'usage, sans classification *a priori*, d'interprétations exhaustives et multicritères permettra incontestablement de faire de l'étude des humus l'un des traits dominant de la définition des écosystèmes en raison même de leur importance quantitative à l'interface vie/abios.

2.4.4. Le subécosystème endogé

On ne peut étudier l'organisation systémique par une simple succession d'évènements depuis la synthèse végétale (p. 133), son émanation (p. 136) et l'accumulation-dégradation globale dans les sols des produits organiques (p. 137), sans décrire plus synthétiquement les processus en cause. Ces processus sont encore mal connus et font toujours l'objet de synthèse où la part des hypothèses et des supputations sur des potentialités (p. 31) est relativement importante. C'est que le sol est le système le plus complexe (p. 118) ; il abrite en outre une part importante de la biosphère des terres émergées (p. 130). C'est environ 80 % des organes et organismes consommateurs qui y trouvent leur habitat. Malheureusement nos connaissances objectives sont freinées pour diverses raisons d'ordre scientifique (Avertissement, 3ème partie) mais aussi techniques, notamment en raison du caractère opaque, solide et structuré du système qui gêne considérablement nos moyens d'interventions. Dans ce paragraphe, on insistera surtout sur les aspects qualitatifs de processus relativement connus, quoique souvent omis, malgré leur importance écosystémique.

Cela sera fait ici par une considération générale sur la dégradabilité et les organismes endogés avant d'envisager deux cas plus spécifiques de systèmes écologiques fonctionnels focalisés sur la racine et les lombriciens comme cas particuliers de mécanismes parmi d'autres.

1. Dégradabilité et organismes

Deux apports chimio-énergétiques parviennent au soi :

- a) par voie racinaire
- b) par voie gravilaire depuis les organes épigés.

Les matières organiques sont de nature très variée (p. 139) et les possibilités d'utilisation de ces substrats dépendent du couple nécromasse-organismes ou plus exactement de l'adaptation de ces derniers aux propriétés de cette nécromasse, avec de nombreuses interactions (FITTER *et al.*, 1985).

Or cette nécromasse est issue d'une biomasse qui a souvent été élaborée avec un mode de résistance aux biolytiques et aux contraintes physiques (squelette, substances toxiques, composés peu nutritifs, ...) dont la nécromasse hérite. Les plantes qui fournissent l'essentiel de la nécromasse subissent une biolyse aigüe de la part d'animaux herbivores, de champignons et de procaryotes parasites. Souvent leur structure histologique et leur composition biochimique présentent des propriétés de "résistance" aux antagonistes dont certaines se maintiennent post-mortem dans la nécromasse. Ceci est particulièrement vrai pour des plantes ayant une "stratégie" de résistantes ("stress-tolérant") (p. 245).

A l'inverse, les racines ont des aptitudes fonctionnelles d'exploration du sol et d'assimilation avec des phytonutriments qui sont étendues par l'existence de coopérations entre les plantes et d'autres organismes endogés, notamment par l'émanation par le végétal de substances nutritives favorisant les organismes co-opérants. Cette prime stimulant la microflore ("priming action" de JENKINSON, 1966) s'observe également dans le transit intestinal des lombriciens (BAROIS et LAVELLE, 1986 ; MARTIN *et al.*, 1987). Elle est probablement (pas de preuve actuellement *in situ*) l'un des processus essentiels de la mobilisation des éléments biogènes par l'injection d'énergie stimulant la décomposition au niveau des racines (ELLIOT *et al.*, 1979 ; CLARHOLM, 1985) et des transits intestinaux lombriciens.

Les plantes produisent donc des émanais relativement biorésistants, sélectionnés par des antagonismes, et des exsudats dont certains favorisent des coopérations.

Les sols abritent l'essentiel des procaryotes des écosystèmes émergés. Ces microorganismes ont un rayon d'action très limité car dépourvus d'undulopodiums (p. 188) ils ne peuvent avoir qu'un déplacement très limité. Leurs colonies agissent donc à l'échelle cellulaire en émettant des exo-enzymes dans leur milieu. Ces exo-enzymes augmentent les molécules assimilables à partir des substrats énergétiques environnants. Après épuisement du substrat la colonie subsiste par des formes de résistances.

Les protoctistes, surtout représentés par les protozoaires (amibes, ciliés, ...) ont l'aptitude d'une phagotrophie et pour certains, ayant des undulopodiums, une mobilité limitée ; il s'agit de prédateurs à l'échelle cellulaire entraînant les conséquences de la biolyse (p. 223).

Les champignons ont une aptitude migratrice à l'échelle métrique ou décimétrique avec des moyens de pénétration au niveau micrométrique de la cellule : leurs ecto-enzymes peuvent être placées en des sites précis très variés grâce aux croissances mycéliennes.

Les animaux ont à la fois une phagotrophie et une mobilité potentiellement importante ; leur phagotrophie peut s'exercer sur des matériaux organiques importants dont la taille est limitée par celle de l'organisme. Or, cette taille est également limitée par les aptitudes au déplacement dans un milieu solide poreux. Le déplacement animal se fera alors en se fauillant entre les solides (notamment chez les

vermiformes, très nombreux : nématodes, *Enchytraeidae*, lombriciens) ou/et par travail mécanique du sol (lombriciens, taupe, ...).

L'importance relative des groupes est d'autant plus difficile à comparer que leurs propriétés sont diverses pour chacun d'eux et que leurs fonctions sont souvent différentes et mutuellement complémentaires. Les biomasses, malgré les réserves que l'on peut faire sur cette expression (p. 85) donnent une idée de l'ordre de grandeur. Parmi les microorganismes les bactéries représentent usuellement 1 g/m^2 mais atteignent parfois 30 g/m^2 . Les champignons varient considérablement de 1 et 10 g/m^2 (WITKAMP, 1971) tandis que les protoctistes sont négligeables. Les animaux varient aussi considérablement de 1 g/m^2 dans des sols pauvres à 60 g/m^2 dans des sols à mull, riches en lombriciens anéciques (masses sèches).

Ces propriétés biologiques fondamentales s'intègrent dans des organisations fonctionnelles biophysicochimiques spécialisées ou syntégrons (p. 192). L'un tendant à augmenter le pouvoir des racines par la biostimulation de leur activité minéralisatrice, ou fixatrice, de colonies microbiennes proches du rhizoplan d'une part, et d'autre part, des possibilités de transferts endogés par le développement de mycorhizes. L'autre, fondée sur l'activité animale, tend à surmonter la "résistance à la dégradation", que la nécromasse a héritée grâce au travail mécanique phagotrophique et au transfert vertical, renforcé par une coopération digestive de microorganismes (bactéries, actinomycètes, protoctistes et champignons) ; elle crée souvent des structures porales stables (p. 149).

2. Le syntégron racinaire

La racine vivante est un organe dont on ne fait que concevoir les liens périphériques fondés sur une orientation de pénétration et de croissance distale. Elle reçoit environ la moitié du carbone photosynthétisé dont elle libère environ la moitié dans le milieu.

Le développement des racines est dépendant des aptitudes physiologiques de la plante, de la compétition entre végétaux et des propriétés des sols. Parmi ces dernières propriétés, l'organisation physique varie à différents niveaux d'observation (hétérogénéité de la parcelle, du profil et dans l'organisation microstructurale). Les propriétés du sol dépendent de ses constituants (texture notamment, mais aussi activité biologique, hydricité et états de la nécromasse impliquant une structuration, p. 139) et des actes humains (assainissements, irrigation, labour/non labour, tassement du machinisme, pesticides, engrais, ...).

La racine, comme toute expression phénotypique, reflète par son organisation la structure intrinsèque de l'espace et les contraintes-possibilités offertes par le milieu. Les disponibilités de pénétration physique dépendent des proportions du plasma (minéraux $< 2\text{gm}$), du squelette (minéraux $> 2\text{gm}$) et des vides du sol qui peuvent être organisés par le brassage biologique (p. 149) en une macroporosité des agrégats et grumeaux. Dans cet ensemble (plasma + squelette, vides organisés = fond matriciel) des galeries résultant de l'activité des animaux fousseurs du sol (surtout lombriciens, mais aussi fourmis, coléoptères, myriapodes, ...) constituent souvent le cheminement-préférentiel des racines (fig. 2-10). Les parois de ces galeries ont des propriétés structurales stables, chimiques et microbiologiques particulières qui en font un milieu radicalement différent du fond matriciel. C'est notamment en raison des échanges physiques, chimiques et biologiques (activités animales, racinaires, ...) qu'elles sont le siège d'une vie intense et différencient ainsi un biosol dans un ensemble inerte (= résosol). Les relations fonctionnelles racines/systèmes biophysicochimiques des sols ne sont pas encore décrites de façon totalement intégrée mais un bon aperçu en est donné par CALIOT *et al.* (1982) essentiellement au plan du fonctionnement racinaire, des relations avec la phase liquide, la structure et l'agencement du soi.



Figure 2-10 - Les galeries lombriciennes sont une voie privilégiée de pénétration des racines (galeries de *Nicodrillus* sp., photo de M. SaUSSEY).

En outre, des relations trophiques de coopération organismes/racines existent dans le sol. Si les racines puisent dans le sol notamment par leur assise pillifère, et par symbiose avec les mycorhizes, elles excrètent aux rythmes de leur physiologie, des exsudats (mucilages, sucres, acides aminés) et libèrent des desquamations et tissus temporaires (cellules absorbantes, cellules externes de l'apex, cellules corticales, radicelles) qui fournissent au milieu une source d'énergie entraînant différents processus. Faute de mesure directe WOLDENDORF (1981), et BOTTNER et BILLES (1987) admettent que les racines utilisent 50 % des photosynthétats ; 10 à 20 % du carbone photosynthétisé est émané pendant la croissance (hors nécrose racinaire) sous formes volatiles, hydrosolubles et insolubles. Le CO_2 représente environ les 3/4 des volatiles ; les solides proviennent notamment de diverses cellules épidermiques telles celles de desquamation de la coiffe. Ces estimations indirectes sont recoupées par WAREMBOURG (1977) qui estime *in situ* que la part du matériel issue des photosynthétats est métabolisée en CO_2 pour moitié après élimination dans la rhizosphère.

Cette énergie éliminée va entretenir une microflore saprophyte diversifiée (bactéries, champignons, actinomycètes) qui remplit diverses fonctions :

1) Décomposition/minéralisation des produits éliminés par la racine mais aussi de la matière organique antérieurement plus ou moins résistante à la décomposition ; l'effet de biostimulation par ajout de substrat aisément assimilable stimule l'activité enzymatique microbienne (Sallih *et al.*, 1987). Ce processus est évidemment stimulé par les organismes biolytiques (p. 223) ; à cette échelle, il s'agit de microphages (protozoaires, particulièrement amibes, nématodes, rolifères, ...) qui rajeunissent et dispersent les colonies (BOTTNER et BILLES, 1987).

2) L'activité biologique elle-même crée des conditions de tension d'oxygène réduite et d'énergie métabolisable importante, au moins dans certaines conditions climatiques et à certaines heures du rythme nyctéméral, par une exsudation

favorisant la fixation libre d'azote au niveau de la rhizosphère, par des bactéries de genres variés *Azotobacter*, *Beijerinckia*, *Derxia*. L'importance de cette fixation est difficile à établir ; elle n'est significative qu'en conditions de température élevée, notamment sous les tropiques (DOEBEREINER, 1974). Elle implique des échanges organiques entre symbiotes dans les deux sens.

3) Dans certaines circonstances, cette microflore contient des germes qui ont un rôle antibiotique susceptible de supprimer les attaques de germes phytopathogènes. Il s'agit de sol favorisant, par exemple une microflore à *Fusarium oxysporum*. On qualifie ces milieux de "sols suppressifs".

4) Certaines racines apportent également dans les milieux asphyxiques de l'oxygène permettant leur propre activité vitale mais aussi créent un milieu périracinaire oxygéné comme en témoigne la précipitation du fer ferrique Fe^{+++} après oxydation de la forme ferreuse Fe^{++} soluble et donc mobile.

5) A côté de ces relations rhizosphériques liées à l'élimination de molécules organiques, il y a de véritables symbioses dont la plus importante et répandue est celle des mycorhizes permettant une "extension" du système racinaire dans l'espace, mais aussi dans les capacités assimilatrices (capacité télémetabolique différente des champignons) (voir mise au point BOTTNER et BILLES, *op. cit.*).

6) Moins généralisées dans le règne végétal, les symbioses à fixation d'azote sont classiquement connues dans diverses familles de Spermatophytes et jouent, au moins pour certaines d'entre elles, un rôle essentiel.

Ainsi, la racine ne peut en aucun cas être considérée comme un élément séparé. Elle est intimement liée au syntégtron dont elle constitue la partie centrale relayée par les symbiotes, les exsudats, la rhizosphère dans un système d'échange avec un abios plus général (fig. 2-11). Cette unité fonctionnelle assure une intimité des échanges qui limite très fortement les pertes (= l'ouverture) du système par quelque moyen que ce soit. En aucun cas, il n'est possible de réduire les relations sol-racines à un dispositif hydroponique où le sol est un support physique incluant une solution nutritive absorbée par les racines.

L'importance économique de l'étude fonctionnelle *in situ* de ce syntégtron est donc particulièrement grande et reste largement à faire. Signalons que WAREMBOURG (1977) a établi qu'*in situ* le réseau racinaire global d'une prairie dégrade environ 12 % des assimilats végétaux nets, en suivant ceux-ci grâce au ^{14}C . Cette "respiration racinaire" est en fait la marque du catabolisme d'assimilats végétaux ayant transité via le végétal vers le syntégtron racine. Ce syntégtron utilise également, comme nous l'avons vu, des sources carbonées issues de la nécromasse du sol.

3. Le syntégtron lombricien

La source chimioénergétique parvenant sur le sol, par voie gravitaire (= litière), mais aussi dans le sol, sous forme de produit émané par les racines, est souvent reprise par le compartiment relativement macroscopique des lombriciens. Une des originalités de leur activité est un évident investissement dans le travail physique du sol qui, il est vrai, est alimenté par un apport énergétique considérable (litière) de l'ordre de 2 640 W/m² (BOUCHE, 1980) qu'ils partagent pour l'essentiel avec les microorganismes et quelques autres animaux endogés. L'action lombricienne peut être décrite en terme global - avec cette nuance que certaines espèces font plutôt certaines fonctions. Les catégories écologiques lombriciennes seront présentées ultérieurement (p. 245).

La matière organique gravitaire apportée par la litière disparaît rapidement pour les herbacées à relativement bas C/N tandis que les formes à C/N élevé (feuilles coriaces de caducifoliées) seront d'abord l'objet d'une attaque microbienne où les champignons des pourritures blanches jouent un rôle important. Certains lombriciens, tel *Lumbricus terrestris* enfouissent les litières résistantes "pour incubation" avant ingestion.

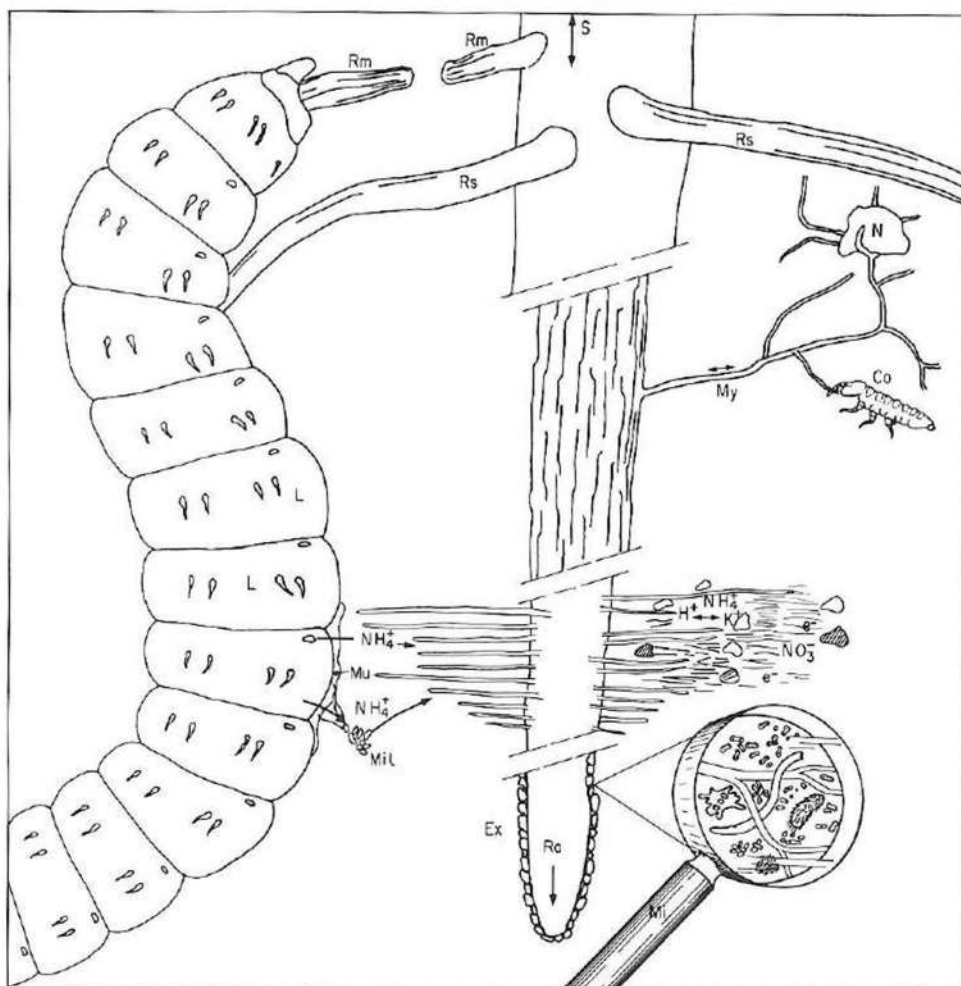


Figure 2-11 - Schématisation des relations biophysicochimiques dans le système racine-sol. La racine croît distalement (Ra) et, à même niveau produit des exsudats et desquamations cellulaires (Ex) favorisant une riche microflore (Mi) rhizosphérique de bactéries, champignons, protozoaires et nématodes. Puis les poils absorbants échangent activement avec le milieu physique ayant des charges cationiques et avec les micro et macroorganismes, dont les lombriciens (L), excréant l'ammoniaque ou le mucus (Mu) que les microorganismes libres (Mil) minéralisent. La racine augmente son pouvoir pur les symbiotes qui, via les mycorhizes (My), exploitent les éléments biogènes de la nécromasse (N), et par le développement de racines secondaires (Rs). Les animaux, tels les colleniboles (Co) mycophages, consomment tant des organes vivants que les racines mortes (Rm). Tous ces échanges communiquent avec le sous-système aérien par gravitation, par diffusion de fluides et par mouvements de sève (S).

La cinétique d'enfouissement et de minéralisation en présence des lombriciens est très sensiblement accélérée (fig. 2-12). *In situ* au cours du transit intestinal, une part importante de la matière organique est décomposée (par exemple 46 % in BOUCHE *et al.*, 1983) (p. 127).

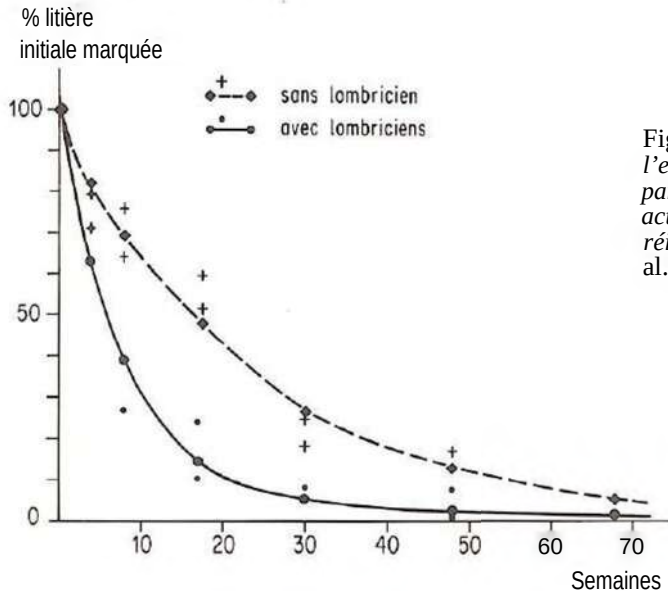


Figure 2-12 - Accélération de l'enfouissement de la litière par les lombriciens : le mull actif (d'après DIETZ, 1979, réinterprété par BOUCHE *et al.*, 1987).

L'azote est particulièrement assimilé tandis que la matière organique des parois cellulaires indigeste est mise en étroit contact inframillimétrique avec les éléments minéraux dont les phyllites des argiles (fig. 2-14, p. 151), avant d'être déféquée.

L'azote détourné par le métabolisme lombricien est très rapidement ré-excrélé (10 % de renouvellement corporel par jour : FERRIERE et BOUCHÉ, 1985), sous forme d'ammoniaque, d'urée et surtout de inucoprotéines (CORTEZ *et al.*, 1987) qui sont rapidement dégradées puisque au printemps cet azote pénètre dans les végétaux très rapidement (9 à 10 jours à environ 8°C). Il est vrai que le chevelu racinaire est en étroite connexion avec la drilosphère (zone du sol travaillée par les lombriciens où les protéolytiques abondent (LOQUET *et al.*, 1977) (fig. 2-11) de sorte que le rendement du transfert est excellent (supérieur à 96 %) et couvre une part non négligeable (de l'ordre de 8(1 %) des assimilais végétaux azotés d'une prairie au printemps (BOUCHE et FERRIERE, 1986) (fig. 2-13).

Il y a donc étroite connexion des synlégrons lombriciens et racinaires avec la litière dans la partie biologiquement active du sol (= biosol).

Les matériaux concassés et brassés par les lombriciens sont déféqués soit dans le sol si la macroporosité le permet, soit en surface, selon une disposition en grumeaux agrégatifs (fig. 2-6, p. 129). Dans ces grumeaux, la vie microbienne est intense et donne une stabilisation transitoire (quelques mois) à ces agrégats, grâce à la production de polysaccharides dont on connaît l'importance pour cette propriété physique (GUCKERT, 1970). Indépendamment MONNIER (1963) a montré que les apports herbacés (des engrais verts) avaient un effet important mais transitoire dans la stabilité structurale des sols.

Replacée dans son contexte moi phofonctionnel, cette observation qualitative est importante car elle expliquerait l'essentiel de la stabilité structurale utile en prairie.

Les cycles saisonniers d'apport (estival) suivi d'agrégation (essentiellement automnal) permettent d'expliquer la bonne stabilité structurale des prairies au moment critique d'automne, hiver, printemps. Les apports de matières organiques exclusivement herbacées permettent un permanent renouvellement des grumeaux transitoirement stabilisés. Cette propriété devrait être étudiée à travers les cinésés (renouvellement) qui y sont liées, la production de grumeaux étant d'environ 300 T/ha/an pour 1 tonne d'anéciques (Al ADDAN, 1990).

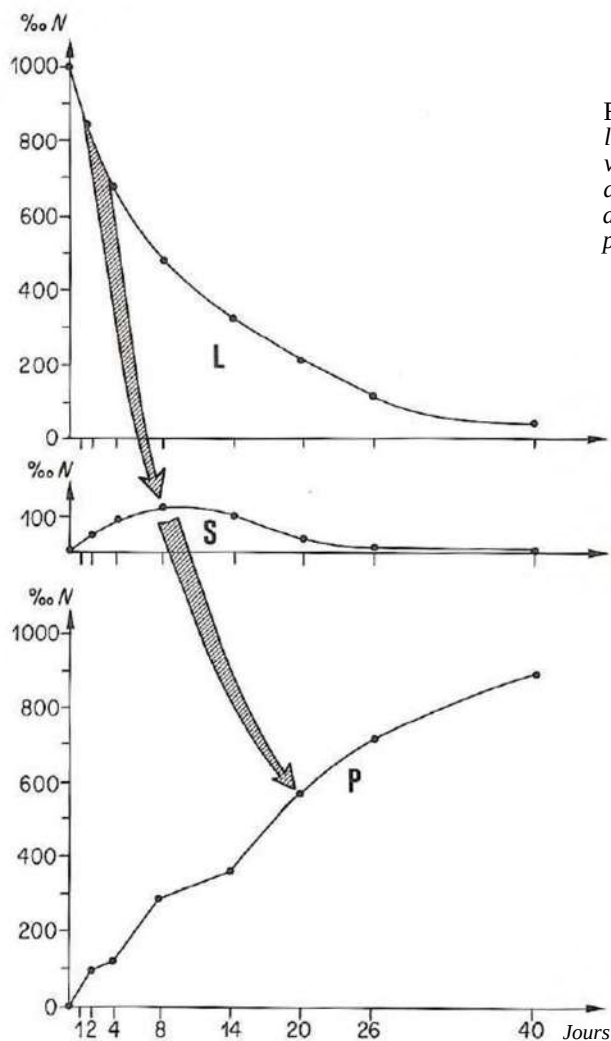


Figure 2-13 - Transit in situ de l'azote, depuis les lombriciens (L) vers les plantes (P) via le sol (S) d'après FERRIERE (1986) (voir aussi fig. 2-6, p. 129 et fig. 2-20, p. 171).

Cette incubation microbienne permet après un certain temps - encore mal connu - une réingestion des fèces par les lombriciens. Comme beaucoup d'herbivores le pouvoir digestif de ces animaux est trop limité pour une digestion complète malgré l'existence de cellulase dans leur tube digestif. Les lombriciens s'alimentent ainsi depuis un cycle coprodigestif où digestion et incubation de fèces alternent temporellement (fig. 2-6, p. 129). Leur aptitude à digérer les tanins (65 % des apports

d'azote foliaire) est par contre spectaculaire et se fait dès le premier transit intestinal (fig. 2-14).

Les agrégats ainsi formés, à partir des fèces organo-minérales, sont le siège d'intenses lyses minéralisantes en partie la matière organique et libérant des éléments biogènes. A ce stade, les racines envahissent ces agrégats en les renforçant de leurs tissus d'une part et en les intégrant dans un "mat racinaire" typique dans les systèmes prairiaux de climat tempéré à population lombricienne élevée.

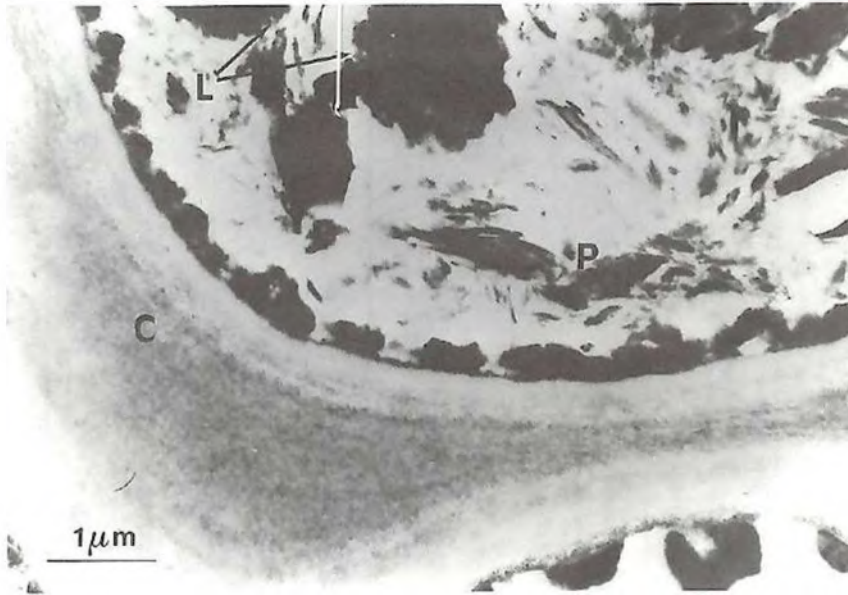


Figure 2-14 - Brassage inframillimétrique des éléments organominéraux dans l'intestin de *Nicodrilus velox* (Bouché, 1967). La paroi cellulaire (C), encore intacte, d'une feuille morte de hêtre (*Fagus sylvaticus*) emballe un mélange d'argile dont les phyllites (P) sont, au contact de l'ex-contenu cellulaire, tannés initialement en corpuscules régulièrement sphériques et opaques aux électrons. La lyse digestive (L) de ces sphères est visible.

Les lombriciens anéciques, principaux responsables de l'incorporation des matières organiques figurées dans le sol, consomment en surface celles-ci mais les digèrent en profondeur avant de les redéposer éventuellement vers la surface (fig. 2-6, p. 129). Cette digestion-métabolisme est réglée par des conditions thermiques et hydriques quasi constantes, ces animaux régulant leur température et hydricité par déplacements verticaux dans le profil thermique (p. 208) et hydrique du sol, pendant leur période d'activité.

Les galeries parcourues quotidiennement par ces animaux sont tapissées de racines actives (fig. 2-10, p. 146) et sont le siège d'une drilosphère microbienne caractéristique (fig. 2-15) où se concentrent notamment 43 % des microorganismes fixateurs libres d'azote (témoignant des exsudats racinaires ?) et 18 % des protéolytiques du sol total, témoignant des lyses des mucoprotéines lombriciennes excrétées.

Ces galeries jouent, pour celles qui sont occupées par un animal, un rôle important dans la pénétration des fluides (air, eau) dans le sol. De premières indications permettent de leur attribuer l'essentiel de la percolation de l'eau dans les profils sains : une forte corrélation ($r = 0,966$, $P < 0,01$) a pu être montrée entre cette percolation et la biomasse lombricienne d'anéciques (Al ADDAN *et al.*, sous presse) (fig. 8-4, p. 520).

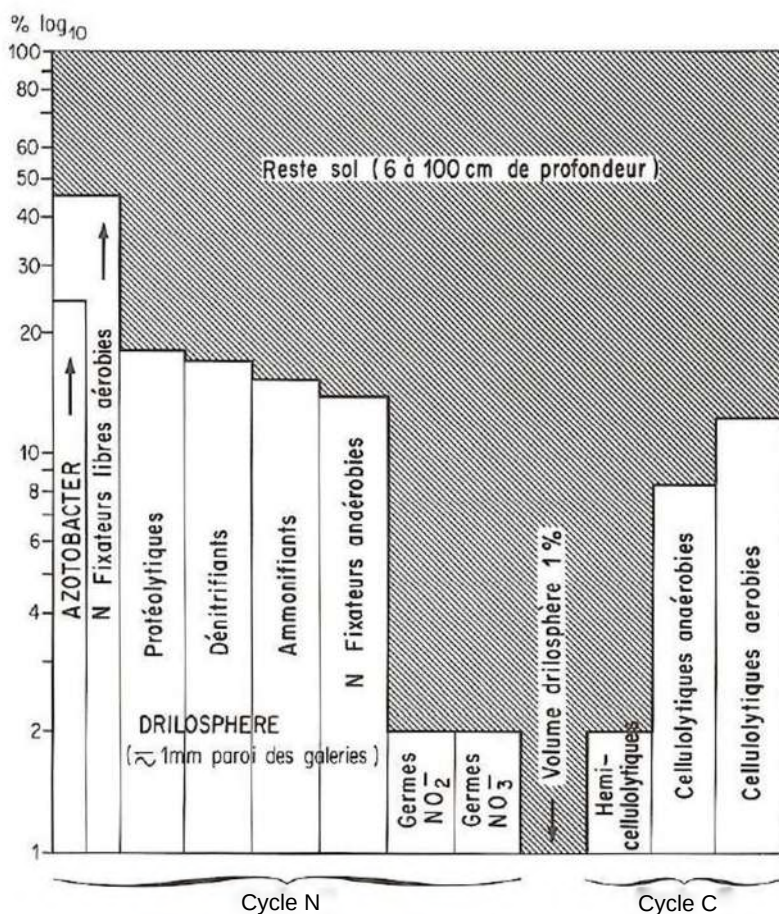


Figure 2-15 - Richesse microbienne relative du biosol des parois de paeries (drilosphere) par rapport au sol total (= 100 %). Données d'après LOQUET *et al.* (1977).

Il est à remarquer que cet ensemble poral n'est pas entièrement ouvert. Sur les 4 000 km/ha de galeries observés à Cîteaux. IKRETSZCHMAR, 1978) environ 10 % sont effectivement ouverts à la circulation verticale de l'eau (LOPEZ ASSAD, 1987). D'autres lombriciens, les endogés, consomment du sol en le rejetant après brassage derrière eux, en laissant des discontinuités physiques.

L'action complémentaire des divers lombriciens se traduit d'ailleurs macroscopiquement par de sensibles différences d'ingestats. Ainsi LAVELLE *et al.* (1980) décrivent pour plusieurs stations tropicales une distribution verticale de divers lombriciens, notamment liée à une nécromasse diversifiée dans les profils de sol où

dominent les endogés géophages. FERRIERE (1980), en étudiant les ingestats et en identifiant les débris végétaux ingérés par divers lombriciens prairiaux, caractérise la consommation des racines et litières et montre que ces ingestats diffèrent très sensiblement en fonction des taxons. Ainsi deux "sous-espèces" cohabitantes ont des régimes totalement distincts *Nicodrilus longus ripienla* Bouché consommant essentiellement *Dactylis glomerata* L. et *Alopecurus pratensis* L. et *N. longus longus* (Ude) des *Festuca* sp..

Les pluviollessivats (— suspensions dans l'eau) circulent pour l'essentiel dans le sol par écoulements gravitaires orientés par la morphologie de la drilosphère. Au point qu'au moins une espèce (*Haplotaxis gordioides*, Hartm. 1821) s'est spécialisée dans le filtrage des particules organiques circulant dans les drains naturels et artificiels, en formant des "pelotes d'individus" filtrantes.

Le mécanisme global d'action et coaction des lombriciens avec les racines conduit à un système biophysicochimique intégré particulièrement efficient. Les végétaux bénéficient d'un court-circuit des éléments nutritifs où les microorganismes jouent un rôle permanent mais stimulé par le travail de lyse, translocation, agrégation, aération, brassage de substances et de mise à disposition par recyclage d'éléments nutritifs (fig. 2-9, p. 140). On observe, d'après BaROIS et LAVELLE (1986), au cours du transit intestinal un remarquable accroissement des hydrosolubles en début de digestion qui sont ultérieurement assimilés avant dépôt des fèces.

La conséquence globale de ce phénomène apparaît par le non stockage excessif de nécromasse, la maturité des matières organiques existantes et la quasi neutralité du pH des mulls actifs (p. 142).

4. Oompléments

Le subécosystème sol ne saurait se réduire aux deux syntégrons racinaire et lombricien - en fait l'état de nos connaissances est trop inadéquat pour en donner une idée équilibrée. Il y a lieu de tenir compte d'autres relations : l'herbivorie de certains nématodes notamment suçant les racines et les parasitant. Ces herbivores ont un rôle probablement normalement restreint mais posent dans les sols agricoles "simplifiés" de graves problèmes économiques.

Les microorganismes jouent un rôle considérable qui a été décrit fonctionnellement dans le cadre des cycles des éléments. La plupart d'entre eux, agents d'un télé-métabolisme primaire, se développent dès que les conditions leur sont favorables. Ces conditions dépendent du péduclimat mais aussi de l'activité biologique globale, végétale et des deux syntégrons racinaires et lombriciens. Toutefois, certains sont susceptibles d'une relative autonomie par des aptitudes migratoires propres par voies sporales et mycéliennes et par des lyses importantes.

Les microarthropodes semblent jouer un rôle qualitatif, voir quantitatif non négligeable pour la microflore, l'activant notamment par un rajeunissement et par des transferts de propagules.

On ne saurait être complet en ne rappelant pas les rôles très diversifiés et spécialisés de multiples Enchytraeidae et larves d'insectes "décomposeurs" ou coprophages qui se développent particulièrement dans les accumulations organiques qui n'ont pas été éliminées par les lombriciens (sol à moder, coprophagie en période sèche). Notons qu'assez curieusement ALBRECHT (1984) montre une très grande stabilisation des matières organiques après l'action des *Enchytraeidae*. Dans ce cas l'accumulation de nécromasse est postérieure à l'action d'un saprophage qui induirait une minéralisation secondaire lente (TOUTAIN, 1987). D'une façon générale, dans les moders et les mors, la faune de taille modeste est dominante en nombre et en biomasse (HUHTA *et al.*, 1986) et y jouerait des rôles très diversifiés.

Soulignons enfin notre ignorance, tant les diverses disciplines concourant à la compréhension des écosystèmes - et particulièrement du subécosystème endogé - sont de développement très inégal et conséquemment nos connaissances en ce domaine

sont biaisées. Une intéressante tentative de restitution cohérente a été toutefois récemment effectuée par COLEMAN *et al.* (1983) sur la base des mécanismes mis en évidence par des études en microcosmes.

4.5. Hydrosphère : systèmes aqueux

Comme je l'ai indiqué dès l'avertissement, l'objet de cet ouvrage, l'écologie opérationnelle, sera illustré essentiellement à partir des écosystèmes terrestres émergés en raison des aptitudes limitées de l'auteur. Il est toutefois difficile au niveau de la partie "Fondements" d'omettre totalement les écosystèmes aqueux de l'hydrosphère qui couvrent 71 % de la surface de l'écosphère.

La vie s'est différenciée avec une certaine autonomie (homéostasie) parmi ce système physicochimique général, très probablement à l'interface hydrosphère marine/porosphère avec des chimiolithotrophes (p. 75). En acquérant l'aptitude d'une photosynthèse (p. 133) les organismes marins ont pu assurer leur expansion près de la surface (capture d'énergie photique) dans la limite de la disponibilité des éléments biogènes constitutifs des organismes. Ils ont pu envahir les cours d'eau terrestres, y compris souterrains (LAFONT, 1989), et les lacs... puis, via le sol, qui conserve un milieu hydrique assez tamponné, coloniser les terres émergées (GHILAROV, 1956, 1958).

Il est exclu d'aborder ici ce qui fait la spécificité des études d'écologie dans l'hydrosphère mais seulement d'exprimer qu'au delà de sa spécificité (l'eau comme milieu ambiant), ces milieux se prêtent évidemment à une approche systémique et opérationnelle.

Notons d'abord que les relations des organismes avec leur milieu environnant sont pour le necton - cette partie des organismes vivant sur ou dans la porosphère aquatique (sédiments) - assez comparables avec le milieu terrestre. La partie flottante et nageante, le plancton, peut former des systèmes assez largement indépendants des supports solides en ce sens qu'elle comporte à la fois des producteurs (algues, protozoaires, cyanobactéries, ...) et des consommateurs (bactéries, crustacés, poissons, etc.). Ces holocénoses présentent la particularité d'avoir une structure abiotique relativement simple (eau et solutés, nécomasse réduite en suspension) translucide et fluide de sorte que leur étude systémique est relativement facilitée et que l'information écologique (innée) est largement descriptible en terme biocénotique.

Les approches écosystémiques, purement biocénotiques, sont ici mieux justifiées que pour le necton ou les terres émergées.

De fait, les apports hydrobiologiques à l'écologie sont importants depuis MOEBIUS, définissant la biocénose (1877), en passant par la description classique d'un écosystème planctonique (LINDEMANN, 1942 ; OUDIN, 1957) à des applications biocénotiques de la théorie de l'information (MARGALEF, 1957). Notons que ces systèmes planctoniques sont également gouvernés, comme tout système, par les mouvements - essentiellement les mouvements aqueux - et les aptitudes de dissolution-suspension des éléments nutritifs. Notamment, ces phénomènes permanents de sédimentation des éléments les plus denses entraînent un appauvrissement du plancton au profit du necton qui par son rôle décomposeur (non exclusif) libère les éléments biogènes minéralisés. Ces éléments chimiques vont être, ou non, solubilisés selon des formes variant avec les propriétés de l'eau - tel le pH - résultant de l'ensemble des propriétés biophysicochimiques de ces systèmes. À ce niveau, l'écosystème bios/abios est indissociable. Ceci va commander entre autres les échanges thermiques, la dissolution du CO₂ et surtout de l'oxygène (peu soluble) et de nombreux éléments biogènes (P, N, Si,...). Dans les grandes masses océaniques les éléments biogènes éliminés par sédimentation font souvent défaut et sont le facteur limitant de la biomasse planctonique. L'organisation des mouvements et

spatiales y est donc très importante et bien décrite, notamment par MARGALEF (1982).

Les échanges thermiques et certains phénomènes cosmologiques (attraction lunaire, rotation terrestre) entraînent une turbulence des eaux (courants, marées) qui permet une remontée des éléments biogènes vers les zones aérées et lumineuses (euphoriques) de la surface où se développe le phytoplancton. Les hydro-ascensions sont souvent associées à un courant ayant également une composante horizontale car elles résultent de changements d'almoclimats (tel le Gulf Stream) ou de franchissement de seuils sous-marins (tel le détroit de Gibraltar). Elle commande la richesse biologique de ces eaux marines en de nombreux lieux du globe (MARGALEF, 1984 ; Smith, 1976). L'arrêt de ces hydro-ascensions peut avoir des conséquences catastrophiques pour la vie planctonique, les oiseaux marins, qui s'en nourrissent, et les pêcheries - tels les El Niño qui périodiquement, au large des côtes andines, désignent à la fois un courant à l'irte hydro-ascension et l'arrêt périodique et catastrophique de ce courant (WYRTKI, 1978).

Depuis les milieux terrestres émergés ou côtiers, les apports d'éléments biogènes peuvent être modestes ou au contraire excessifs. Ils sont modestes notamment dans les zones à faible activité minéralisatrice (zones froides) et forte pluviosité (dilution) et conduisent à des milieux oligotrophes. A l'inverse, certains apports excessifs peuvent résulter des activités humaines (rejets d'eaux usées) et entraîner, depuis un statut en éléments biogènes plus pauvre, un déséquilibre par eutrophisation. Notamment la surproduction végétale flottante induit une asphyxie en profondeur (excès de décomposeurs et suppression du phytoplancton profond privé de lumière).

Les systèmes dulçaquicoles terrestres forment des sous-systèmes très dépendants de l'environnement immédiat (= système très ouvert) qui alimente les petites mares et les rivières (par les chutes d'insectes, de vers de terre, de graines, et ... en éléments biogènes par les apports d'eau de ruissellement ou d'infiltration). L'étude de ces processus est importante pour la pêche et l'exploitation aquatique en général. Au niveau du globe, les systèmes terrestres dépendent en retour des systèmes aquatiques à la fois en raison des échanges thermiques et cinétiques (vents, courants) atmosphère/hydrosphère, en raison du réservoir thermique (l'eau est un caloporteur) et de l'apport d'éléments nutritifs recyclés vers les continents par les aérosols, la pêche et les oiseaux côtiers.

2.5. Formalisation des échanges énergie-matière

2.5.1. Couplage des cinèses d'énergie et matière

L'écosphère est un vaste ensemble de systèmes que l'écologue étudie, et que le technicien modifie. Les systèmes en cause (p. ai) ne fonctionnent, c'est-à-dire ne sont systèmes ayant entre compartiments des échanges, que grâce aux cinèses modifiant les états de ces systèmes (p. 44). Ces cinèses ne sont mues, n'existent que dans un cadre thermodynamique général (p. 52) dans lequel une organisation s'est mise en place (p. 72, 133). Les composants de l'écosphère (p. 109) étant l'objet de blocages et mouvements dans l'espace-temps (p. 119) peuvent faire l'objet d'études relativement formalisées (p. 98). Cette formalisation se réfère aux systèmes réels mais généralement ne portent que sur certains aspects de ceux-ci, du fait même des approches sectorielles.

Avant d'aborder cette formalisation, il y a lieu de noter le caractère simultané et quasi-synonyme des concepts de cinèses, mouvements, réactions chimiques et échanges dégradatifs d'énergie et, en conséquence, leur étroite intrication.

Au plan opérationnel, scientifiquement et techniquement objectif, quels que soient le niveau de perception et les options analytiques, les observations portent sur des caractéristiques d'état ou des cinèses ; elles sont relatives à des composants systémiques biotiques ou/et abiotiques (p. 95). Rappelons que ce qui se passe à l'intérieur d'un compartiment d'un système étudié n'est pas opérationnellement à prendre en compte (ou alors par un changement de niveau on décompose ce compartiment en un système opérationnel ou systemon) : un état observé et une cinèse d'entrée ou sortie d'un compartiment concernent tout le compartiment. On ne peut étudier un système, donc un objet écologique, sans fixer au préalable les limites du systémion étudié.

La cinèse permet le changement d'état :

1) en changeant la proportion des éléments chimiques (et de leurs complexes moléculaires, structuraux, individuels, ...) des compartiments affectés par cette cinèse.

2) en permettant la transformation (p. 46) par "réaction" du nouvel élément (au sens large) incident dans le compartiment avec les éléments antérieurement présents, qu'il s'agisse de la réaction chimique simple ($\text{HCl} + \text{NaOH} \Rightarrow \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$) ou d'interférences complexes (prédateur $\rightarrow$ proie $\Rightarrow$ ingestion/mort de la proie) ou simples (accumulation de litière, ...).

3) en ordonnant les réactions. Celles-ci étant exergoniques (dissipation d'énergie) et le déplacement étant également exergonique (perte d'énergie par convection et frottement) les cinèses-réactions sont orientées. Si une réaction inverse est parfois possible, c'est au prix d'une dépense énergétique élevée, de sorte que globalement les cinèses sont orientées irréversiblement.

En conclusion, toute cinèse, tout changement d'état... donc tout état est la résultante de dépenses énergétiques. L'absence de dépense énergétique implique un blocage du système considéré ; il n'est plus à proprement parler fonctionnel et n'est plus un système, aucune relation ne connectant les compartiments de celui-ci. Il peut toutefois s'agir d'un système à activité (fonctionnement) provisoirement suspendue.

Mouvements d'éléments et d'énergie sont donc consubstantiels. Toutefois à chaque Cinèse, une part de l'énergie disponible est dégradée en chaleur et une part est conservée. Globalement, la chaleur quitte le système par radiations : c'est le deuxième principe de la thermodynamique (p. 65). L'écosphère dans son ensemble est un système énergétiquement ouvert dégradant l'énergie incidente en chaleur rayonnante par différentes étapes ; il ne s'agit que d'un cycle partiel : un hémicycle énergétique. Au plan des éléments chimiques, l'écosphère est par contre pratiquement un système largement fermé en cycles (p. 109).

Tous les sous-systèmes de cette écosphère, y compris les êtres vivants, s'inscrivent dans cette règle générale. Ils appartiennent à des cycles d'éléments chimiques bouclés en permanence et couplés à l'hémicycle de dégradation énergétique ouvert. Pour que les éléments soient échangés dans leurs cycles, il faut un mouvement permis par la dégradation de l'énergie de sorte que circuit-énergétique et cycles des éléments sont couplés et concomitants. Les divers éléments chimiques réagissent entre eux pour former des édifices simples (molécules), complexes (macromolécules), très complexes (individus, roches, nécromasse, etc...) et interdépendants où les divers cycles sont nécessairement couplés mutuellement.

L'étude de chaque cycle d'éléments, de chaque portion de circuit énergétique pris isolément, est donc un choix réductionniste dans le domaine de la composition (option sur quelques éléments) dans le domaine du temps (à une période donnée) et de l'espace (vis-à-vis de tels sous-systèmes de l'espace) qui ne peut traduire la totalité de la réalité du système étudié.

Toutefois, d'un point de vue opérationnel l'étude de la portion de cycle d'un élément chimique dans un système est réalisable et permet d'effectuer des bilans entre composants car il y a conservation de la matière et de l'énergie (avec dégradation).

Dans ces bilans on nommera d'ailleurs rendement la part d'une cinèse par rapport à une autre. Ainsi, dans le circuit énergétique, il est classique de considérer à partir d'une source d'énergie incidente dU_i/dt , le rapport $dU_a/dt / dU_i/dt$ de l'énergie non dégradée dU_a/dt après cinèse, à l'énergie incidente.

A partir des données analytiques disponibles l'écologue peut donc reconstruire une partie de la systémique matière-énergie, en considérant tour à tour le circuit énergétique ouvert (p. 175) et les cycles des éléments (p. 164). Il peut parfois considérer des portions plus globales, telles les rendements en biomasses dans les chaînes alimentaires (p. 163) malgré les limites de ces expressions (p. 85).

Décrire les systèmes écologiques, c'est organiser sur la base de schématisations, ces compartiments et cinèses entre les organismes et leur milieu selon des modèles conceptuels, que nous aborderons d'abord.

2.5.2. Modélisation écologique conceptuelle

1. **Place des métabolons et transits**

D'une façon générale, les échanges d'énergie biochimique se font à partir d'une entrée dont la plus importante dans l'écosphère actuelle est la photosynthèse. Cette photosynthèse est effectuée par les producteurs (p. 133). Les macromolécules organiques ainsi formées, et émanées dans le milieu par les producteurs, vont se dégrader soit, hors métabolon sous l'influence de divers phénomènes physicochimiques (photolyse, réactions chimiques d'oxydoréduction, y compris catalysées par des enzymes libres), soit métaboliquement après assimilation (p. 82). Certains organismes consommateurs tendent à s'assurer leur substance énergétique (leurs assimilais) par diverses actions (p. 222) dont l'ingestion de plantes ou d'animaux (phagotrophie) permettant une action digestive sur le milieu extérieur isolé dans un tube digestif, ou une vacuole.

On peut donc décrire ainsi une chaîne trophique comme une succession d'organismes puisant leurs aliments séquentiellement à partir d'organismes en amont et constituant les aliments d'autres organismes en aval. Mais comme nous l'avons indiqué paragraphe 1.6.6., entre les métabolons génotypiquement contrôlés, il y a un compartiment de transit, ou plus brièvement un transit.

Ce compartiment de transit est le siège de dégradations énergétiques dont des digestions, réactions non-couplées et dégradation enzymatique de la matière. Après assimilation dans le métabolon, il y a également globalement dégradation. Ainsi métabolons et transits se succèdent en alternance.

D'une façon plus générale, on peut décrire dans certaines chaînes des organismes fonctionnant en parallèle (il sont dits alors du même niveau trophique) telles les plantes fixatrices, tels les herbivores ingérant tout ou partie de ces plantes. Entre ces niveaux des faisceaux de transits (F) regroupent les matériels abiotiques émanés par le niveau précédent et non encore assimilés par le niveau suivant.

En fait, la plupart des métabolons puisent à plusieurs sources nutritionnelles et pas nécessairement au même niveau. Les phagotrophes peuvent avoir une action biolytique herbivore mais assimiler simultanément depuis des ingestats issus des plantes, de microorganismes, d'animaux eux-mêmes situés à des niveaux très variés (et généralement confus). Par exemple, le Renard "carnivore typique", donc consommateur secondaire du schéma classique simpliste "herbe-lapin-renard", ne s'alimente plus que de 73 à 14 % de lapin avec l'apparition des fruits (2 à 75 %) entre avril et juillet (JULLIOT, 1987) ; ou encore dans un autre territoire cet animal opportuniste exploite essentiellement un "décomposeur" (des modèles conceptuels classiques), le ver de terre, ou des détritiques humains (MAC DONALD, 1980). On voit que l'étude effective des compartiments et aliments interdit l'adoption d'un modèle par niveau trophique qui obligerait tantôt à placer cet animal dans les frugivores, les carnivores classiques, les régulateurs de populations endogées, ... Et encore j'omets ici les consommations, par ce vertébré, d'oiseaux, d'insectes, de végétaux, de rongeurs divers, mollusques, poissons, amphibiens, ... Pour cette raison, les écologues s'efforcent de décrire des réseaux trophiques qui lient les divers transits et métabolons dans les chaînes alimentaires interconnectées.

La modélisation conceptuelle des échanges trophiques comporte nécessairement une étroite intrication de transits abiotiques et de métabolons. Rappelons, ce qui a déjà été développé au paragraphe 1.6.6., que ces métabolons incorporent, sous le contrôle de leur génome, des matières-énergies par assimilation et rejettent les matières-énergies par émanations.

Les assimilations peuvent être radiatives (photosynthèse, thermorégulation), gazeuses (inhalations respiratoires et photosynthétiques) ou liquides (solutions chargées de molécules diverses).

Les émanations peuvent être radiatives (thermogenèse du bilan exergonique, thermorégulation), gazeuses (exhalaisons respiratoires et photosynthétiques), liquides (excrétats solubles), solides (excrétats solides : desquamations... et tissus morts) ou physiques (travail mécanique, déplacements racinaires ou corporels, chute de litière, etc.) (fig. 1-8, p. 83).

Les métabolons agissent éventuellement sur le milieu pour faciliter leur métabolisme (= actions télé-métaboliques) (l'homme ayant en outre des motivations socio-économiques, p. 27).

Ils agissent

1) par émanation d'enzymes, de solutions excrétées ayant parfois un pouvoir lytique (acides, ...),

2) par modification des conditions biologiques de l'entour : culture de champignon, par certaines termites, entretien d'une microflore rhizosphérique intestinale ou coprotrophique, élevage du bétail ou cultures vivrières, associations symbiotiques,

3) par actions mécaniques physiques : broyage, fouflage, manducation, concassage en gésiers, brassage endentérien et déplacement d'éléments pour soins aux pontes ou aux jeunes, garde-manger, soustraction à des compétiteurs, etc.

Ces actions télé-métaboliques tendent à favoriser le maintien du métabolon, mais échappent quant à leurs conséquences à sa régulation métabolique propre même si, chez les phagotrophes (digestion) ou les plantes (rhizosphère), par exemple, cette action tend à favoriser l'assimilation. D'autres actions télé-métaboliques (e.g. fouflage lié à un comportement de parade nuptiale) n'ont pas une finalité directement trophique.

En considérant maintenant globalement les cinèses d'énergie-matière, on peut constater que dans l'écrasante majorité des cas, ces mouvements alternent entre métabolons et transits, seules exceptions les liaisons intimes de deux métabolons (*e.g.* un endoparasite osmotrophe et son hôte, ou les échanges osmotrophiques directs entre symbiotes : mycorrhizes, lichens, ...) qui forment globalement un synmétabolon.

En sélectionnant les relations de quelques chaînons d'une chaîne trophique de ce réseau $T_n \rightarrow M_{n+1} \rightarrow T_{n+1} \rightarrow M_{n+2} \dots$ la relation de loin la plus banale est de type $T \rightarrow M \rightarrow T \leftarrow M$. Toutefois, des relations osmotrophiques peuvent relier directement un organisme (M) à un autre (relation $M \rightarrow M$). C'est le cas de la relation intraspécifique des embryons d'euthérien $M \rightarrow M$, des symbioses $M \leftrightarrow M$, des endosymbioses ($M(M)$). On peut considérer les liaisons $M \leftarrow M$, $M \sim M$ ou ($M(M)$) comme constituant un synmétabolon (M'). Parfois, l'abios est sous contrôle partiel de l'organisme qui est en amont, $M_1 \leftarrow T_i \rightarrow M_2$, tel le nectar T_i excrété par la fleur B1 utilisable par un Lépidoptère Sphingidae M_2 . Ce contrôle partiel est plus souvent exercé par l'organisme aval notamment par l'action des phagotrophes $M_1 \rightarrow (T_i \rightarrow) M_2$.

De cette façon, effectivement tout (syn-)métabolon M reçoit et émet dans le milieu respectivement par assimilation et émanation et entre deux (syn)métabolons. Réciproquement tout élément de transit T reçoit et émet respectivement par émanation et assimilation.

En posant les symboles M pour (syn)métabolon, N pour niveau trophique, T pour élément de transit entre deux métabolons, $M_1 \leftarrow T \rightarrow M_2$, et F le faisceau de transits entre deux niveaux, la relation la plus générale peut s'écrire, en réseau trophique (fig. 2-16).

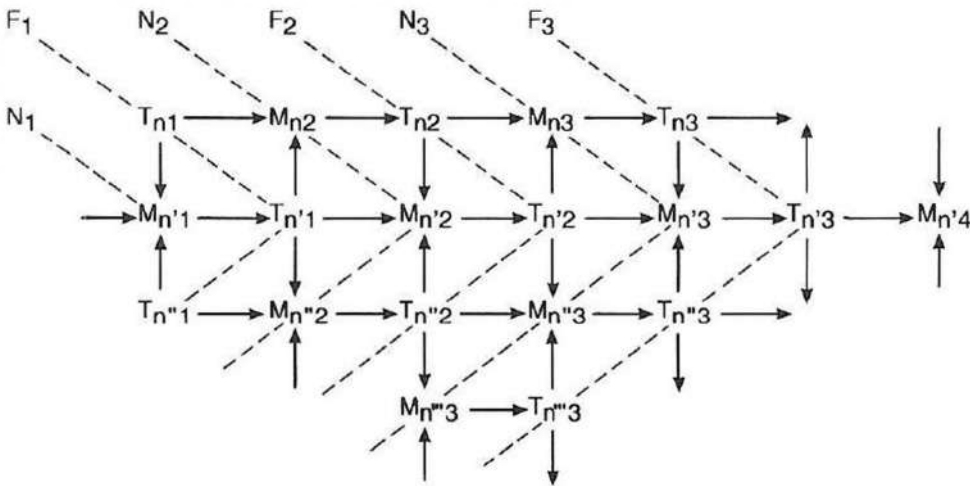


Figure 2-16 - Réseau trophique. Représentation simplifiée en considérant les chaînes trophiques dans seulement deux dimensions et en admettant que chaque niveau trophique N_n , $N^{n'}$, ... n'est formé que de métabolons M_n , M_n' , ... et ne s'alimente que d'un niveau donc via un seul faisceau de transit F_n, q (ce qui est exceptionnel). Chaque flèche indique une cinèse spatiotemporelle. Les dégradations énergétiques (exergoniques) interviennent en M et T.

Les mouvements impliquent une dégradation énergétique de chaque compartiment. T et M reçoivent ou émettent de l'énergie radiative, l'ensemble étant parcouru par le flux général décrit au paragraphe 2.3.1., entre les radiations de la source chaude principale, le soleil ($\approx 5\,800^\circ\text{K}$ environ) et les ré-émissions terrestres (à environ 255°K) vers l'espace (3°K).

Les êtres vivants sont pour l'essentiel dépendants de la photosynthèse (p. 133) produisant des synthétats énergétiques par accumulation d'électrons (réduction) créant une accumulation d'énergie biochimique (p. 79). Les consommateurs sont, les métabolons privés de ce pouvoir de création d'un bilan croissant de synthétats énergétiques mais, à l'inverse utilisent ceux-ci pour assurer leurs réactions globalement exergoniques.

Des dégradations importantes s'effectuent sans action biologique (décomposition par le feu par exemple). Dans les écosystèmes la dégradation énergétique, très importante dans les divers niveaux biologiques, est également très notable dans la partie abiotique. Il n'est pas rare que 90 % de la matière organique présente dans un système soit au stade nécromasse (= somme des transits). Même si l'intensité des réactions exergoniques dans cette nécromasse est proportionnellement réduite, la dégradation y est en définitive importante en raison de la taille de ce compartiment de transit. Une dégradation de la nécromasse à cinèse relative moyenne réduite au dixième de celle de la biomasse... est équivalente à celle-ci en valeur absolue (fig. 2-17).

2. Modèles écosystémiques

Nous n'avons considéré, jusqu'à présent que les sous-systèmes biologiques (métabolons) dans un ensemble abiotique indéfini. Or nous avons vu que l'écosphère est structurée par ses compartiments (p. 109) et ses cinèses (p. 119) conduisant à une organisation systémique (p. 133). La compréhension des écosystèmes exige une synthèse conceptuelle.

Cette synthèse doit être opérationnelle, c'est-à-dire permettre une démarche scientifique relative aux faits partiellement perçus par les données de la globalyse (p. 37, 97) du champ écologique, en permettant la modélisation de ces informations (infosystèmes, p. 401), puis la déduction scientifique de prédictions réfutables dans le champ écologique (p. 35).

Pour des raisons historiques et didactiques les outils rigoureusement opérationnels d'une telle systémique sont classiquement occultés, car l'absence de moyens de synthèse jusqu'aux années 80 limitait leur intérêt. Il n'en est plus de même aujourd'hui. C'est au contraire, l'absence d'une conceptualisation opérationnelle et factuelle qui rend aujourd'hui obsolète nombre de recherches (p. 455).

C'est pourquoi, ce paragraphe traitera d'abord des modèles conceptuels opérationnels - auxquels seront comparées ultérieurement, au chapitre III, les schématisations conceptuelles biocentriques classiques.

11 faut d'abord bien préciser l'objectif de cette modélisation conceptuelle : il s'agit de synthétiser les données ayant exclusivement trait aux états et cinèses, des systèmes écologiques.

Ceci exclut tout finalisme causal, même fonctionnel, ayant trait aux mécanismes. Par exemple, une chenille (une vache ou un protozoaire) ingérant un bol alimentaire ne l'assimile pas mais agit d'abord sur le milieu intestinal : l'éventuelle assimilation, à partir directement ou indirectement de ce bol, sera postérieure et ne portera pas sur les états initiaux de ce bol.

Ceci exclut toute simplification non justifiée et réfutable. Toute synthèse implique des simplifications, mais celles-ci sont des hypothèses qui doivent être explicites et réfutables. Par exemple, réduire les émanations végétales aux seuls élaborais prélevés par les biolytiques (herbivores) pourrait se concerver, si l'on démontre que les autres émanats bioénergétiques, tels les excrétais (notamment exsudais racinaires) ou les élaborais nécrosés (p. 136) des tiges, feuilles et racines sont négligeables.

Ceci implique aussi que la démarche conceptuelle conduite à une synthèse depuis les données et non à un pur exercice d'idées, et que ces données soient assez nombreuses pour ultérieurement permettre une modélisation factuelle et prédictive.

La façon concrète la plus simple revient à regrouper les métabolons fonctionnant "en parallèle", c'est-à-dire ayant mêmes ressources trophiques, mêmes assimilats et mêmes émanais. Ceci est effectivement possible localement avec une bonne approximation, pour les métabolons de la même espèce et de la même écophase. Malgré une variabilité individuelle ces divers métabolons effectuent dans le milieu une fonction globalement comparable et donc simplifiable.

Dans d'autres cas, c'est un ensemble de taxons qui peuvent, avec une plus grossière approximation, être regroupés en un niveau trophique : celui des producteurs. Globalement ceux-ci fonctionnent énergétiquement en parallèle (assimilation photosynthétique et de nutriments minéralisés dissous dans l'eau). Quoique régulés en poikilothermes et en poikilohydriques, ce niveau trophique est fortement structuré selon des types écologiques (p. 244) conduisant à des émanais fort diversifiés. Le niveau trophique "producteur" est donc un concept opérationnel limité.

A partir des producteurs, les émanais végétaux bio-énergétiques (exsudais, feuilles, Liges, racines, ...) subissent des dégradations énergétiques par les enzymes libres et diverses actions mécaniques, climatiques et digestives.

Le niveau des phytophages permet de regrouper très approximativement des animaux exerçant une ingestion soit de parties vivantes (herbivorie) soit de nécromasse végétale (foin, litière) plus ou moins transformée par les microorganismes. Les microorganismes jouent en effet un rôle de décomposeurs parallèle à celui des phytophages auxquels ils sont d'ailleurs souvent associés en coopération (p. 144).

Les phytophages peuvent être relativement spécialisés et dans ce cas un début de chaîne alimentaire peut être décrit, de même certains parasites des végétaux ou des animaux sont spécifiques de sorte que la relation métabolon —•- transit — métabolon peut dans certains cas particuliers être décrite en termes de (syn)metabolons définis ci-dessus.

Classiquement on distingue également les prédateurs ayant une action biolytique sur des microorganismes (cas de protozoaires) ou sur des animaux (carnivores).

En fait opérationnellement, ces distinctions, importantes pour étudier les régulations démographiques par biolyse (p. 223), sont trophoénergétiquement inopérantes : l'écrasante majorité des métabolons décomposeurs puisent leurs assimilats à partir d'éléments de transit provenant de métabolons très divers. Nous avons décrit ci-dessus la phytophagie du "carnivore" renard, les lombriciens sont à la fois phytophages et microphages (à l'exception de carnivores rares)... ce qui les distingue peu de la vache au plan des relations tropho-énergétiques (alors que l'herbivorie les distingue fortement), etc.

Il y a donc essentiellement non pas des chaînes trophiques (à l'exception de quelques chaînons) mais des successions : transit — métabolon — transit — ... organisées en réseaux. Il est parfois possible de considérer des groupements approximatifs de métabolons fonctionnant essentiellement, (surtout) en parallèle (les niveaux N) et de considérer entre ces niveaux des faisceaux de transit (F) (fig. 2-16). La plupart de l'énergie biochimique est dégradée au niveau des décomposeurs phytonecrotrophes (microorganismes et animaux) et très probablement du faisceau de transit reliant les métabolons producteurs et ses décomposeurs.

Notre ignorance des cinèses effectives dans les écosystèmes à partir des "producteurs", dont les émanats bio-énergétiques sont très mal connus (p. 242, ainsi que l'absence d'études concrètes sur la dégradation énergétique du faisceau "producteur—••transit—••décomposeur" gênent considérablement présentement toute approche systémique objective. Toutefois, une telle modélisation conceptuelle n'est plus inaccessible et l'étude des infosystèmes, même encore très limités à certains objets de ce système, pourra contribuer à une telle synthèse par connexion de sous-modèles validés, au fur et à mesure du progrès des connaissances (p. 404, 427). Il est préférable de reconnaître les producteurs autotrophes dont les métabolons fonctionnant en parallèle et les consommateurs hétérotrophes qui globalement jouent

un rôle de dégradation énergétique, avec ou sans biolyse, avec actions successives ou en parallèle et avec ou sans tube digestif (fig. 2-17).

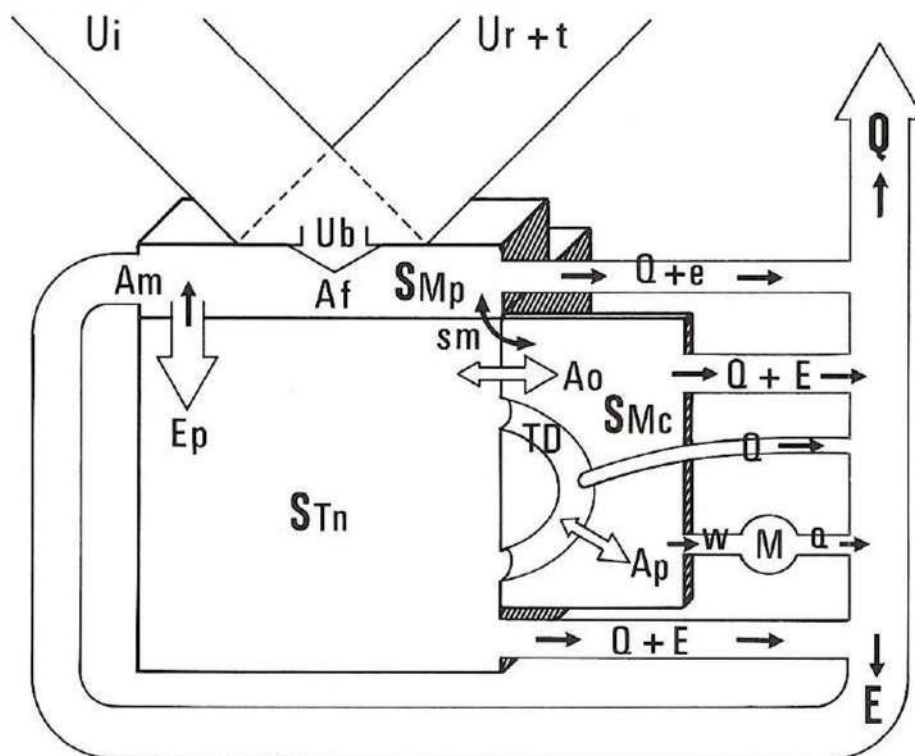


Figure 2-17 - Schématisation des échanges trophoénergétiques d'un écosystème. La somme des métabolons producteurs (SMp) ou autotrophes, est regroupée dans un seul compartiment échangeant essentiellement, via la somme des transits de nécromasse (STn) avec la somme des métabolons consommateurs (Smc.) et très marginalement par un lien direct métabolon-métabolon (synrnétabolon : sm) (les volumes sont approximativement proportionnelles à l'importance relative des compartiments). Les plantes assimilent (Am) les éléments biogènes, de l'énergie lumineuse incidente (Ui) sous l'orme d'énergie biochimique (L'b), l'essentiel du flux lumineux étant réfléchi ou transmis (Lr+t). Cette énergie est ultérieurement dégradée en chaleur (Q) ou émanée sous forme organique en nécromasse (Ep) ensuite assimilée par les consommateurs osmotrophes (Ao), ou via le tube digestif (TD) des phagotrophes (Ap). Un travail (W) sur le milieu (M) ultérieurement dégradé en chaleur (Q) est exercé par les animaux surtout (figuré) mais aussi les plantes (non figuré). La dégradation énergétique Q, réalisée dans ou hors les organismes, libère les éléments biogènes minéralisés en quantité (E) ou modestement (e). Aux échanges principaux Ep, Ao, Ap sont associés des échanges organiques inverses, respectivement assimilation de molécules organiques par les autotrophes et émanation organique par les hétérotrophes. Les extrants et intrants depuis les écosystèmes collatéraux ne sont pas figurés (voir aussi ODUM, 1959 ; Bouche, 1978a ; Stungr en, 1986).

Malheureusement, la primauté de la biologie écologique (p. 201) a conduit à une description des "écosystèmes" réduits aux composants biologiques (= biocénoses) considérés comme seules parties fonctionnelles de l'écosystème.

Ce biocentrisme est accompagné d'un classement des organismes, non pas à partir de leurs fonctions systémiques effectives, mais de leur biolyse apparente dans les seuls parties facilement visibles.

Cette conception néglige totalement les échanges non métaboliques (donc ignore transit T et faisceau F) et à une organisation en chaîne biologique Producteur — Herbivores — Carnivores 1 — Carnivores 2 les "déchets" (= rejets) étant les parties non utilisées (NU) par cette chaîne : les excréments et excrétaux.

Dans cette schématisation, c'est la nature des actions biolytiques qui est privilégiée (herbivores, carnivores, et le reste : décomposeurs) ; les actions télé-métaboliques ayant lieu dans l'endotère sont considérées comme métaboliques.

Les compartiments ainsi définis ne sont enfin pas connectables (p. 398) ; ils interdisent tout autre infosystème que ceux relatifs à la transformation d'un compartiment : les connexions systémiques sont impossibles.

L'importance des organismes, dans une telle organisation en chaîne trophique, va nécessairement en se réduisant des producteurs aux consommateurs de niveau élevé selon une pyramide proposée par ELTON (1927) en raison des déperditions énergétiques approximativement estimées, dès 1942, à 90 % pour chaque niveau par LINDEMANN. Si LINDEMANN distingue bien le concept écologique d'écosystème des approches restreintes basées sur des < "bio-ecological" species-distributional approach >> la plupart des auteurs ultérieurs perdront de vue le sens initial d'écosystème et le réduiront à des modèles purement biologiques.

(le type de modèle uniquement biocénotique, popularisé par ODUM (1959), est didactiquement efficace car il a l'avantage de donner une image immédiatement perceptible par le bon sens (du type c'est le lapin qui mange l'herbe, et qui est ensuite mangé par le renard... le reste étant l'affaire des décomposeurs). Il a le grave défaut de conduire à des comparaisons d'efficacité biologique fort peu cohérente : par exemple la respiration d'un phagotrophe et de son endotère est comparée à celle d'un osmotrophe sans les effets de leur télé-métabolisme sur leur milieu.... (p. 230). Par ailleurs, la totalité de l'énergie dissipée au niveau des compartiments de transit, probablement la part prépondérante de l'énergétique et des échanges d'éléments, est totalement omise (ou arbitrairement incorporée dans les bilans des seuls phagotrophes). Ce type de modèle, inadéquat à l'écologie, est indiqué ici pour mémoire en raison de son succès pédagogique.

2.5.3. Bilan des transferts

D'un point de vue énergétique on peut considérer les bilans de transfert d'énergie dans les transits et métabolons (transits + métabolons - chaînons) dans les réseaux trophiques en considérant chaque chaînon indépendamment. L'entrée d'énergie biochimique Ube (= assimilations pour les métabolons et émanations pour les transits) et la sortie de celle-ci Ubs (émanations pour les métabolons et assimilations pour des transits) d'une part, et d'autre part, le stockage SUB dans le chaînon et la part d'énergie dégradée Qd.

Nous avons alors un rendement énergétique de minéralisation (Rm)

$$R_m = (U_{be} + SUB - U_{bs}) / U_{be}$$

avec des fluctuations positives ou négatives de SUB et où $Q_d + SUB = U_{be} - U_{bs}$.

Des bilans de transferts sont présentés sous des modalités très diverses selon les objectifs des auteurs, ou des types d'informations dont ils disposent. Un paramètre important est souvent évoqué, surtout à des fins appliquées : la production c'est-à-dire la croissance de biomasse d'un organisme pendant une période de temps donnée est, par exemple, rapportée souvent à la quantité de matière ingérée pour exprimer le rendement de la transformation des ingestats en biomasse de consommateur.

Il est à noter que cette production reste non émanée et que dans les systèmes écologiques à l'équilibre, elle est en moyenne nulle, les biomasses oscillant souvent autour d'une capacité locale de maintenance. Elle est par contre une potentialité pour une exploitation par le chaînon trophique suivant, ce qui est le cas des cultures et élevages. A cette fin, de nombreux indices et rapports sont utilisés et présentés dans des ouvrages spécialisés ; ils sortent du cadre de ce livre.

2.5.4. Cycles des éléments

1. Notion générale de cycles

Le cycle des éléments chimiques dans l'écosphère est une notion théorique partant du constat que les quantités totales d'éléments chimiques prises séparément, telle la quantité d'oxygène présente dans l'écosphère, sont quasi constantes et que ces éléments chimiques sont successivement associés par des réactions à des molécules diverses et reviennent après un certain temps aux états préexistants. Pendant cette période de temps, l'élément chimique est associé à divers états moléculaires pour finalement revenir à l'état initial... et poursuivre éventuellement dans un nouveau cycle.

Le succès de cette notion tient aussi au fait qu'il est possible analytiquement de suivre un élément chimique dans ces diverses associations moléculaires et corn parti mentales grâce aux isotopes. Le cycle d'un élément vise donc à décrire les différents compartiments et cinèses de cet élément, en étapes successives jusqu'au retour à une étape initialement prise comme référence.

Au cours de ces descriptions de cycles on peut considérer des niveaux d'observation (dans l'espace-temps) totalement différents selon la spécialisation de l'étude. Soit l'échelle macroscopique, planétaire d'un élément (par exemple, masse de carbone planétaire moyenne sous forme de $C(O)_2$) soit au contraire une réaction d'oxydoréduction particulière associée à ce cycle.

L'avantage de la description des cycles est la possibilité de décrire la continuité et l'organisation des échanges d'un élément chimique qui peut, sous certaines formes moléculaires, faire défaut çà et là.

L'inconvénient est - sous les apparences d'une description synthétique systémique pouvant embrasser les divers niveaux d'observation de l'échelle atomique à l'échelle planétaire- une description artificielle : 1) en "découplant" les autres éléments chimiques associés aux molécules incluant l'élément décrit, 2) en oblitérant le moteur énergétique associé à ces formations pluri-élémentaires de molécules réactionnelles et 3) en négligeant le référentiel temps.

Nous venons de voir que les systèmes écologiques (p. 107) ont des échanges ou des blocages par accumulations dans des compartiments (p. 109, 119) qui respectent les lois chimio-énergétiques. L'énergie chimique et, dans une certaine mesure, les énergies cinétiques et thermiques constituent les moteurs de ces mouvements qui portent sur les éléments chimiques ; ceux-ci sont liés à la diversité considérable des molécules composées et décomposées et en transfert dans les systèmes biophysicochimiques.

Leur fréquence, leur rareté ou leur accumulation constituent un des aspects analytiques de l'approche des écosystèmes. Certains éléments peuvent faire défaut pour assurer le développement de certains types de sols, certaines populations animales ou végétales. Ces éléments sont eux-mêmes étroitement canalisés par le système.

On est alors conduit à focaliser la description écosystémique sur un ou quelques éléments chimiques. Parmi ces éléments, les éléments biogènes majeurs C, N, H, O, P, K, ... sont l'objet de nombreuses études spécialisées ; la production biologique des milieux dépend souvent de ceux-ci car ils peuvent y être facteurs limitants.

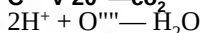
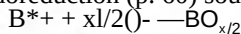
L'intérêt, de leur étude résulte aussi dans la prise de conscience, depuis LIEBIG (1840), du défaut de certains de ces éléments pour la production végétale. Comprendre pourquoi un élément est indisponible (absence ou blocage) dans un écosystème explique les différences parfois spectaculaires de croissances biologiques, en des conditions par ailleurs *a priori* similaires.

Les énergies de liaison sont essentiellement (à l'exception de quelques réactions de chimiosynthèses que nous négligerons ici) liées à la réduction de matériaux par la photosynthèse (p. 133).

Pour schématiser ces matériaux, souvent l'eau H_2O , le gaz carbonique CO_2 et les éléments biogènes ($B +$) ou BO_x (B étant, outre le carbone, l'hydrogène et l'oxygène, les constituants de la matière vivante, p. 116), j'adopte les symboles C , H , O , B .

Cette réduction conduit à une molécule $C_xH_xO_xB_x$ (x = en proportion variable) énergétique car ayant accumulé des électrons liés créant une différence de potentiel d'énergie biochimique.

Les réactions d'oxydation, globalement exergoniques, fournissent ces électrons à un accepteur d'électrons, dont le principal est l'oxygène moléculaire O_2 , $O_2 + 4e^-$ O^{2-} , tandis que H^0 devient H^+ , B^0 devient B^+ et C^0 devient C . Ces réactions décrites ici globalement sont exergoniques et conduisent aux formes oxydées (BO_x , CO_2 , H_2O) par des réactions finales d'oxydation, par une succession de réactions d'oxydoréduction (p. 60) souvent organisées et couplées dans les métabolons (p. 157)



Globalement les réactions de réduction chargent l'énergie biochimique ($'$) sous forme macromoléculaire organique $C_xH_xO_xB_x$ et tout le fonctionnement réactionnel sera dans les cycles celui des déplacements physiques (dont l'agitation brownienne thermique) (p. 60) mettant en présence les réactifs des réactions exergoniques d'oxydoréduction.

Mais les diverses molécules, ainsi formées dans ces cycles, n'ont pas les mêmes propriétés, en fonction des atomes plus ou moins lourds les composant, de la taille des molécules et des forces de liaisons intermoléculaires (Van der Waals). D'une façon générale, les éléments les plus légers (masse atomique la plus faible) sont associés aux gaz, ceux un peu plus lourds (ou en groupements moléculaires plus compacts), aux liquides ; enfin les atomes les plus denses et les molécules les plus importantes sont à l'état de solides dont les liaisons peuvent être covalentes ou ioniques (p. 57).

Cela signifie qu'un élément chimique dont on suit le cycle sera nettement plus léger (hydrogène : masse atomique 1) et sera alors associé à des gaz (H_2) fréquents ou rares, à des molécules vaporisées, liquides (H_2O) ou lourdes (molécules organiques) atteignant des masses moléculaires de 10.

D'autres atomes fréquents tel l'oxygène ($Z = 16$), le carbone ($Z = 12$), l'azote ($Z = 14$) constituants majeurs de la matière, seront associés à des forces fluides : gazeuses (N_2 , O_2), solides ($C_xO_xH_x...$) ou liquides (NH_4OH , CO_2H_2 , H_2O , ...).

Ces divers états ne sont pas neutres, car, comme déjà indiqué précédemment (p. 119) les fluides sont les principaux mobiles qui permettent les échanges écosystémiques, notamment avec les solides.

Les systèmes biologiques, en raison même de leur nature (p. 74), et par là même les relations des organismes avec leur milieu, sont liés aux éléments chimiques qui, par leur masse atomique et leurs propriétés électroniques, les prédisposent le plus à une réactivité chimique et aux états successivement fluides et solides. Cela exclut les gaz rares (non réactifs) et limite les atomes lourds mais privilégie les éléments chimiques abondants ayant la possibilité de prendre, sous forme moléculaire, les états gazeux, liquides et solides (tableau 2-1, p. 117).

En définitive, les propriétés générales d'un élément biogène seront 1) son association à une "charge énergétique" au niveau de la photosynthèse (ou de tout produit biochimique issu de celle-ci), puis 2) sa mobilité spatiale comme gaz ou/et liquide grâce aux turbidités gravitaires-thermiques, enfin 3) la dégradation énergétique lente des associations moléculaires auxquelles il est lié jusqu'à une forme oxydée...

Cette forme oxydée pourra en l'absence de fourniture d'électrons (d'oxydant) être utilisée comme oxydant dans une réaction de réduction ($\text{NO}_3 \rightarrow \text{N}_2$ ou N_2)... De toute façon elle sera réduite pour reprendre son cycle largement grâce à la photosynthèse. En cela, le cycle est bouclé.

Toutefois, au cours de ces étapes les associations moléculaires des éléments iront de la zone globalement réductrice (= producteur) à la composante abiotique et biotique exergonique (oxydatrice) avant de revenir à la zone réductrice en passant par des phases gazeuses, liquides ou adsorbées sur solides. Adsorbés signifie des liaisons de surface à forces faibles (Van der Waals) ou plus fortes, mais réversibles par échanges ioniques (un ion positif tel H^+ se substitue à un autre, tel K^+ , sur un site "solide" négatif, telle une argile).

Le cycle des éléments se fait donc par des échanges entre atmosphère, hydrosphère et chéradomasse solide, la porosphère (sol, sédiments) étant le siège le plus complexe de ces interactions. Les compartiments pourront outre ces phases liquides, solides et gazeuses, être le siège de phénomènes de réactions d'oxydoréduction chez les bactéries, algues et plantes productrices (globalement réduisant ces éléments auxquels s'associent les autres éléments biogènes B). Ces composés complexes $\text{C}_x\text{-H}_x\text{-O}_x\text{-B}_x$ sont libérés dans une nécromasse qui est oxydée par divers réacteurs chimiques, photochimiques, mécaniques et enzymatiques hors des organismes, ou, après assimilation dans des organismes pouvant partiellement réorganiser les éléments biogènes, mais globalement libèrent ceux-ci sous une forme assimilable par les plantes (H_2O , CO_2 , B^{+}) (B^{+} indique qu'il s'agit en général, mais pas toujours, de cations). Les Livres classiques d'écologie décrivent ces cycles d'éléments et certains ouvrages d'agronomie et d'étude environnementale insistent sur d'éventuels "déséquilibres" dus à la rareté de certains éléments (= facteurs limitants) ou à leur excès (= toxicité).

Certains cycles sont succinctement présentés ici pour illustrer leurs propriétés avec un élément léactif et mobile (carbone), un peu réactif et mobile (l'azote), et un très réactif, mais quasi immobile (le phosphore).

2. Cycle du carbone

Le carbone est mobile dans l'écosphère atmosphérique sous forme gazeuse (essentiellement CO_2 , CH_4 , ...), dans l'hydrosphère sous forme CO_2 ou H_2CO_3 ... et sous forme soluble, en suspensions, émulsions et aérosols, y compris sous forme d'êtres vivants. H est relativement immobilisé sous forme de sédiments carbonatés (calcaire, dolomie, ...) et de composés organiques réduits issus, dans les temps géologiques, de la réduction photosynthétique. Cette réduction du carbone formé en continu de la biomasse organique (compartiment plante), des émanations diverses (exhalaisons respiratoires, substances volatiles et exsudats foliaires, floraux ou racinaires) et des élaborations de desquamations, tant aériennes que racinaires, d'organes ou d'individus, soit par sénescence (chute de feuilles ou mort de racinelles), soit par biolyse (broutement d'herbivores). Il est habituel d'appeler productivité primaire nette la quantité d'assimilat produit par photosynthèse, moins les exhalaisons de gaz carbonique... c'est-à-dire la quantité totale de carbone réduit, exprimée sous forme de carbone ou de biomasse sèche, qui est destinée à être (ou est) émanée dans le milieu en tant que telle (carbone réduit).

Il est classique de donner pour formule $\text{PN} = \Delta\text{B} + \text{L} + \text{C}$ où PN = productivité primaire nette, ΔB = le changement de biomasse, L = litière et C

= ingestat d'herbivores (en négligeant les excrétaux divers et les desquamations, ce qui n'est pas négligeable !),

A l'exception de la production épigée des phanerophytes, dont on peut intercepter L par collecte de litière (RAPP, 1984), la mesure de ces paramètres est généralement problématique. C'est le cas de la valeur C ; les estimations de PN restent extrêmement laborieuses et d'une façon générale fort sous-estimées (GOUNOT et YIJ, 1980) dans les surfaces herbacées. WIEGERT et Evans (1964) ont critiqué les méthodes classiques, totalement erronées pour ces milieux et GOUNOT et YIJ (1980) ont proposé une méthode phyllochronique permettant une approche beaucoup plus précise et rigoureuse de la production via une modélisation synthétique relativement opérationnelle.

Cette approche importante néglige encore les excrétaux et desquamations qui pourraient toutefois y être rapportés. Elle ne résoud pas le devenir d'environ 40-50 % du carbone élaboré atteignant le système racinaire (p. 145). Des méthodes globales de mesure à l'aide d'enceintes (ECKARDT, 1968) ou d'étude des gradients entrée-sortie au dessus du sol (SAUGIER, 1970), de mise en oeuvre lourde, mesurent l'ensemble des bilans d'échange écosystémique dont on peut déduire, moyennant quelques hypothèses, la production primaire nette dans certains cas favorables. En général, les mécanismes normaux d'introduction de l'énergie biochimique dans l'hémicycle énergétique, reste donc encore décrits de façon essentiellement qualitative, la plupart des quantifications n'étant pas réfutables par insuffisances techniques. La figure 2-18 donne néanmoins une vue générale des cycles estimés du carbone. Les valeurs émanation et décomposition étant probablement sous-estimées d'un ordre de grandeur...

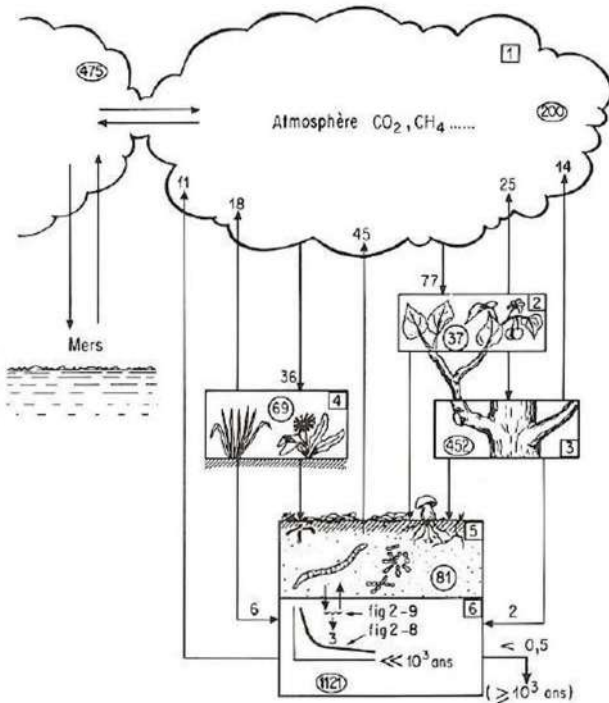


Figure 2-18 - Cycle global du carbone. Diagramme des états (cercles, en gigatonnes — l(r t) et ciñses (flèches, Gtlan) en terres émergées (1970). Principales données d'après EMANUEL et al. (1981) dans 6 compartiments : l'atmosphère (1), la végétation arborée, organes non ligneux (2) et ligneux (3), les herbes (4), la litière (5), la nécromasse endogée "beaucoup plus jeune" que mille ans (6). Une faible fraction vieillit au-delà : les stocks des décomposeurs (1,5 Gt ?) et des biolytiques (= 0,075 Gt) sont négligés.

Le carbone de la nécromasse disparaît en quelques mois, rapidement sous l'effet d'une activité animale, plus lentement en son absence (fig. 2-8, p. 138) certains éléments, comme les tanins n'étant lysés que par peu d'organismes (champignons, lombriciens) d'autres étant l'objet d'une décomposition assez rapide (cellulose) ou beaucoup plus lente (chitine, lignine). Enfin, certains états carbonés, surtout aliphatiques et aromatiques, forment des molécules complexes, dénaturées vis-à-vis des actions des exo-enzymes, non assimilables en raison de leur masse moléculaire et qui ne sont que lentement oxydées, cette petite fraction de matière organique est d'autant plus résistante qu'elle est en conditions réductrices ou qu'elle est initialement dépourvue d'élément biogènes nécessaires aux organismes décomposeurs (cas des tourbières).

Les conditions réductrices, très fréquentes en milieu humide, dues à la faible dissolution d'oxygène (tableau 2-2) dans l'eau, font que les composés organiques issus de la matière végétale ne peuvent être réduits. Le moteur écosystémique de la différence de potentiel d'énergie biochimique allant de la source réduite vers l'oxydée (p. 133) est bloqué. Le carbone organique réduit s'accumule alors dans les sédiments. Les divers états de cette nécromasse ont été décrits paragraphe 2.4.3.Z3. L'énergie végétale ainsi fossilisée est essentiellement exploitée comme combustible, une part est toutefois activement oxydée sous l'impact des travaux agricoles oxydants (labour, apports d'azote stimulant les décomposeurs, ...) ou après usage comme support de cultures (tourbe).

°C	O ₂	CO ₂	CO ₂ /O ₂	n ₂	h ₂ s
0	09,4	3340	48,2	29,4	7066
10	53,7	2318	43,2	23,1	5112
20	43,4	1688	38,9	19,0	3846
30	35,9	1257	35,0	16,2	2983
40	30,8	973	31,6	13,9	2361
50	26,6	761	28,6	12,2	1883

Tableau 2-2 - Solubilité des principaux gaz dans l'eau pure à 760 mm de pression atmosphérique en ppm (mg/l) en fonction de la température. Rapport molaire O₂/CO₂.

Les principales réactions chimiques du cycle du carbone sont résumées tableau 2-3. Enfin les organismes enchaînent eux-mêmes leur action à partir de cette source énergétique (p. 157).

PHOTOSYNTHESE (réduction)	$U + n(CO_2 + H_2O) \rightarrow (CH_2O)_n + nO_2$
OXYDATION ANAEROBIE METHANIQUE	$\bullet 2\alpha(H_2O) + H_2O \rightarrow CH_4 + O_2 + U \text{ (1X2)}$
OXYDATION OXYDATIVE LIMITEE	$2(CH_2O) + O_2 \rightarrow 2CO + 2H_2O \text{ (1X3)}$
OXYDATION AEROBIE	$n(CH_2O) + nO_2 \rightarrow nCO_2 + nH_2O + U \text{ (4)}$

(1) (O₂ ou tout autre oxydant) En milieu terrestre : (2) environ 1 % de l'oxydation, (3) environ 0,04 % du gaz émané. (4) 99 % de l'oxydation

Tableau 2-3 - Principales réactions de réduction et d'oxydation du cycle du carbone en milieu terrestre.

La nécromasse en se décomposant libère des molécules plus petites. Les grands polymères fabriqués par les organismes sont peu à peu scindés en monomères puis oxydés (tableau 2-4).

La nécromasse des sols, et à un moindre degré des sédiments marins, est intensément oxydée par de multiples réactions chimiques, physiques et enzymatiques. La chératomasse carbonatée peut, en fonction du pH soit se développer à partir du CO_2 , soit se gazéifier par des réactions d'équilibre en solution aqueuse, la solubilité du CO_2 dans l'eau étant élevée et variant suivant la température de 3,35 g/l à 0°C à 1,26 g/l à 30°C en pression standard (tableau 2-2). Avec l'eau, une réaction d'équilibre $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}(\text{X})_3' + \text{H}^{+**} \rightleftharpoons \text{CO}_3'' + 2\text{H}^+$ varie avec le pH du milieu, les carbonates précipitant souvent $((\text{X})_3\text{Ca})$ mais étant parfois également solubles (CO_3Na_2) (Gg. 2-19).

Outre le pH, la salinité, jouant sur l'alcalinité des eaux océaniques, a un rôle déterminant dans la régulation du CO_2 dissout et donc dans son équilibre général avec l'atmosphère.

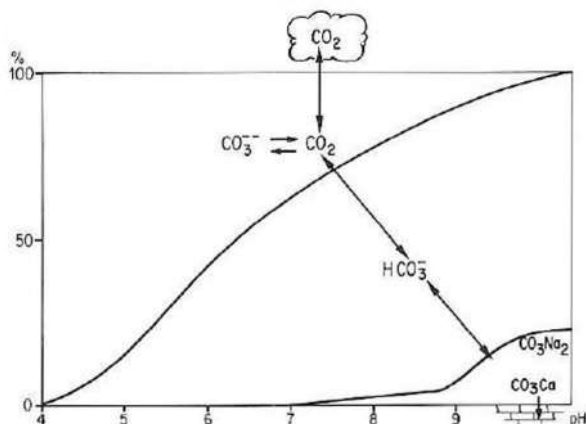


Figure 2-19 - Proportion des divers oxydes de carbone dans l'eau à différents pH et équilibre avec CO_2 gazeux et carbonate.

Les actes humains divers (exploitation et combustion des carbones fossiles, réduction du stock des biomasses par déforestation, réduction de la fixation chlorophyllienne par l'agriculture et la désertification, chaulage des sols acides, oxydation mécanique ou biochimique du stock humique, solubilisation de carbonates par les pluies acides issues des industries) expliqueraient une augmentation constante du CO_2 de l'atmosphère qui croît actuellement annuellement de $2,5 \cdot 10^9$ tonnes de carbone par an. La teneur de l'air a été estimée à 260 ppm dans la période pré-industrielle et atteint aujourd'hui environ 340 ppm, ce qui peut entraîner une modification profonde de notre climat (p. I 14).

3. Cycle de l'azote

L'azote représente 78 % de l'air essentiellement sous forme de N_2 (90 % du stock terrestre), une faible fraction (1 %>) est incorporée à la nécromasse et moins de 1 pour mille à la biomasse terrestre, le reste étant en gaz dissous ou sédiments océaniques. Son cycle est néanmoins couplé à celui des matières organiques où il est présent sous différentes formes essentielles à la vie, telles les protéines (16 % d'azote). Les plantes absorbent très facilement la forme réduite, l'ammonium-gaz NH_3 par les feuilles et sous forme ionique NH_4^+ par les racines. Cette forte assimilabilité peut conduire à une intoxication dans le cas d'excès d'ammonium (cas normalement exceptionnel, mais non en agronomie).

L'azote se présente sous différentes formes selon le potentiel d'oxydoréduction, dans son cycle général (tableau 2-4).

NOM	FORMULE	OXYDATION	NOTES
Ammonium	NH_4^+	-3	Gaz, phytonutriment
Ion ammonium	NH_4^+	-3	Dans l'eau, $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$ Phytonutriment racinaire
Radical aminé	$-\text{NH}_2$	-1	Constituant des protéines
Hydroxylamine	NH_2OH	-1	
Azote	N_2	0	Gaz assez inerte
Oxyde nitreux (hemioxyde)	N_2O	+1	Oxyde gazeux
Oxyde nitrique (monoxyde)	NO	+2	Produit de combustion
Ion nitrite	NO_2^-	+3	Lien dans le cycle écologique
Bioxyde d'azote	N_2O_4	+4	Formé par oxydation atmosphérique de NO
Ion nitrate	NO_3^-	+5	Phytonutriment, engrais important

Tableau 2-4 - Cycle de l'azote : formes chimiques principales.

Le cycle le plus court de l'azote entre son incorporation dans les macromolécules végétales et sa décomposition est un cycle exclusivement amino-ammoniacal. L'ammoniac, ou l'ion ammonium, assimilé par les plantes, est incorporé dans les macromolécules organiques (surtout sous forme aminée) qui seront détruites par les décomposeurs réutilisant à leur profit les monomères azotés assimilables, tels les acides aminés, les vitamines, ... en libérant finalement une ammoniaque re-assimilable par les plantes. Seuls font exception les décomposeurs vivant en milieu sec qui excrètent l'urée $\text{NH}_2\text{-CO-NH}_2$ qui, dès que l'humidité le permet, est rapidement transformée en ammoniaque par l'uréase, exo-enzyme très abondante, produite par de nombreux organismes dans les sols (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970).

Dans les systèmes équilibrés, l'ammoniaque est une forme essentielle du transit qui :

1) peut se bloquer essentiellement par échange cationique sur les surfaces solides à charge négative,

2) peut, si le pH est élevé (fréquence de OH^- formant de l'eau avec H^+), prendre la forme gazeuse NH_3 qui devenant atmosphérique est assimilable par les plantes traitant un volume gazeux considérable (notamment en raison de la rareté du CO_2 dans l'air, p. 134).

3) peut enfin être assimilé par les racines des plantes : c'est l'assimilat énergétiquement le plus "économique", mais il implique un équilibre osmotique et ionique complexe coûteux (CALLOT *et al.*, 1982).

4) peut être oxydé, en prenant les formes de plus en plus électronégatives jusqu'au nitrate qui se forme nécessairement en milieu de plus en plus oxygéné et est la forme azotée la plus assimilée par les plantes. Si le milieu devient réducteur ces formes oxygénées de l'azote deviennent des oxydants (accepteurs d'électrons) et la dénitrification (tableau 2-5) intervient.

En présence d'un apport énergétique important assimilable par les microorganismes, ceux-ci assimilant NH_4^+ et NO_3^- peuvent créer une carence pour les végétaux. Ainsi les matières organiques très putrescibles (apport énergétique disponible) sont-elles, dans un premier temps au moins, la source de l'immobilisation

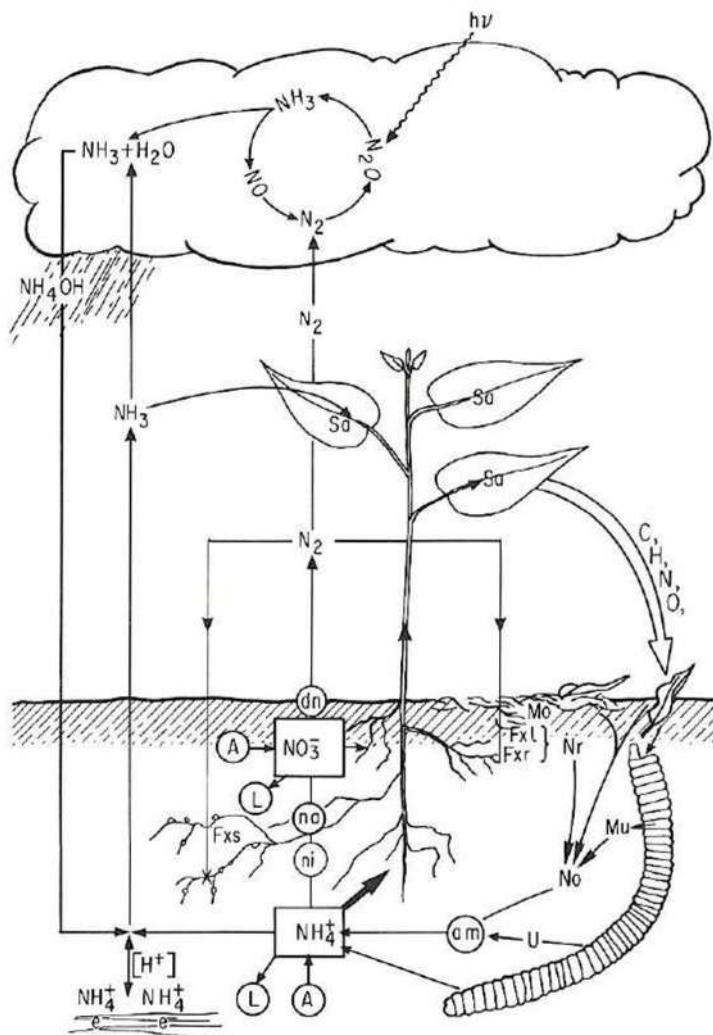


Figure 2-20 - Cycle biophysicochimique de l'azote (gaz = N_2) qui sous l'action photonique lumineuse donne N_2O , NO , voire NH_3 (ammoniac). L'ammoniac atmosphérique provient aussi du sol et est absorbé par les feuilles ou est entraîné au sol par les précipitations. La décomposition depuis les plantes ($C-H-N-O$) libère de l'azote protéique (mucus, Mu , de lombriciens par exemple), uréique (U) rapidement convertie en ammoniacale, et ammoniacale (NH_4^+). Les exsudats racinaires stimulent la fixation d'azote rhizosphérique (Fxr) et libre (Fxl) aboutissant à la réorganisation de l'azote ($N > i$) donnant de l'azote organique (No) qui est ammonifié (am). L'ensemble ammoniacal sera adsorbé sur les sols chargés négativement (e^-), volatilisé sous forme NH_3 ou nitrifié en nitrate (NO_3^-), en deux étapes nitrification (ni) puis nitratisation (na), et éventuellement dénitrifié (dn) en gaz N_2 . Les engrais (A) apportent surtout les formes nitriques et ammoniacales toutes deux assimilées par les plantes pour synthèses aminées (Sa), ou lixiviées (L).

de l'azote assimilable par réorganisation dans les microorganismes, au point que l'on a pu écrire qu'une matière organique peu décomposable (fournissant peu d'énergie) libère plus d'azote qu'une matière très putrescible (BOSATTA et STAFF, 1982). Ce point est technologiquement important, tant pour les préparations des supports de culture organique, que pour l'enfouissement des résidus de culture.

Certaines formes volatiles quittent la phase liquide (N_{2l} , N_2O), comme NH_4 déjà décrit, et se dispersent dans l'atmosphère.

Ces pertes d'azote, antérieurement assimilable par dénitrification en N_2 , N_2O sont compensées par certaines "fixations" réductrices soit photochimiques, en haute atmosphère (FXc) soit biologiques par réaction endergonique d'organismes. Ces organismes puisent leur énergie depuis soit la nécromasse libre (Fxl), soit en commensal depuis des excréta (exsudats racinaires) (Fxr), soit en symbiotes étroitement associés, troquant l'énergie contre l'azote réduite (Fxs) (fig.2-20). Le mobile principal est l'ammoniaque, réorganisé par les plantes mais aussi les microorganismes (No). L'urée et les nitrates jouant un rôle majeur en milieu aérobie relativement anhydre.

Pour l'essentiel, deux énergies jouent un rôle majeur : l'énergie radiative solaire dans la haute atmosphère (Fxc) et surtout, via la photosynthèse (Fxs, Fxl, Fxr), l'énergie biochimique permettant les synthèses organiques essentielles (Sa). Les différentes formes de dégradation énergétique, complexes sont alors exergoniques et aboutissent à l'azote gaz... ou sont reprises par les végétaux (**tableau 2-5**)

PROCESSUS	NOM	FORMULE GLOBALE
Endergonique réduction (+ U, + c', O_2)	Fixation	$U + 2N_2 + WH_2O \rightarrow 4NH_4^+ - OH' + 3O_2$
	Synthèse aminée	$U + 2NH_4^+ - OH' + 4CO_2 \rightarrow 2CH_2-NH_2-COOH + 3O_2$
Exergonique oxydation	Ammonification uréotélique ammoniotélique	$3O_2 + 2CH_2-NH_2-COOH + 2H_2O \rightarrow$ (1) ou (2) (1) $\rightarrow \text{«-NH}_2\text{-CO-NH}_2 + H_2O (+ U)\text{»}$ (2) (2) $\rightarrow 2NH_4^+ + OH' + 2H_2O + 4CO_2 + U$
	Nitrification nitri Cation nitratation	$3O_2 + 2NH_4^+ (OH') \rightarrow$ $\rightarrow 2NO_2' + 2H^+ + 4H_2O + U$ $\rightarrow O_2 + 2N(>2' \rightarrow 2NO_3' + JJ$
	Dénitrification oxydante	$4N\ddot{U}3'' + 2H_2\ddot{U} \rightarrow 2N_2 + 4OH' + 5O_2 + 12$
	Dénitrification organique	$6NO_3' + C_6H_{12}O_6 \rightarrow (6NO_2 + \dots U) \rightarrow$ $3N_2O + 6CO_2 + 3H_2O + 60H' 4- U$
	Dénitrification sulfurique	$6KNO_3 + 5S + 2CaCO_3 \rightarrow *$ $2CO_2 + 3K_2SO_4 + 3N_2 + \underline{U}$

Tableau 2-5 - Principales réactions de réduction et d'oxydation du cycle de l'azote.

4. Cycle du phosphore

Ce cycle est également essentiel à la vie, quoique quantitativement il y soit seulement le dixième de celui de l'azote. Cet élément est notamment, dans les organismes, associés au transport de l'énergie entre réactions biomoléculaires $U + ADP + P \rightarrow ATP$.

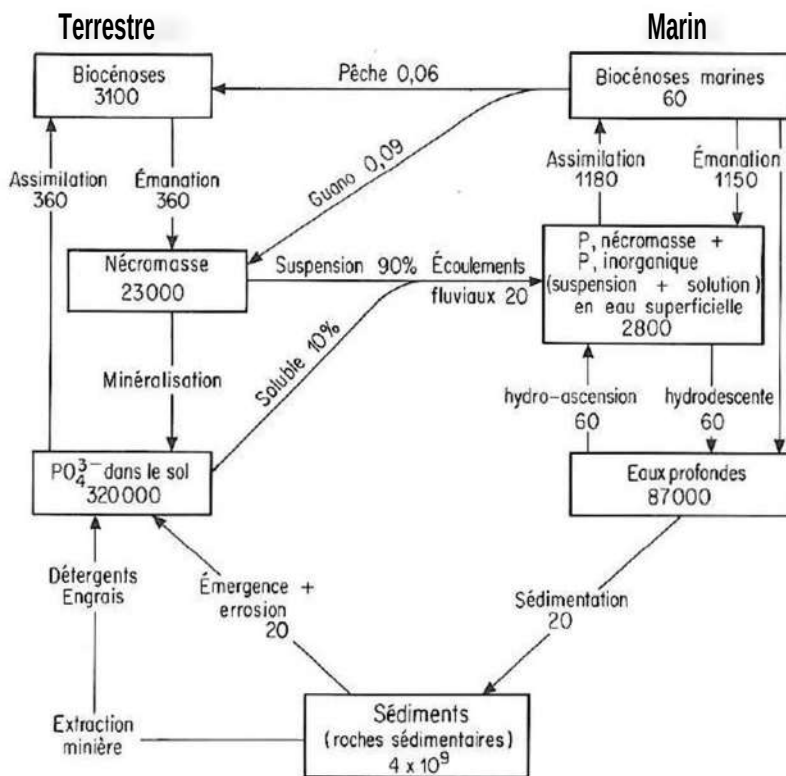
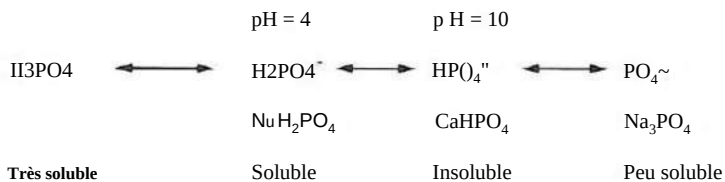


Figure 2-21 - Cycle planétaire du phosphore exprimé en mégatonnes ($= 10^6$ t) pour les compartiments et en Mt/an pour les débits (d'après EHRLICH et al., 1977).

La nature de ce cycle diffère fortement de celle de l'azote en raison de l'absence de formes gazeuses normales et de l'insolubilité de la forme HPO_4Ca (phosphate tricalcique) entraînant une immobilisation sur toute la gamme des pH usuels. Avec la croissance de l'acidité, les formes deviennent de plus en plus solubles de sorte que dans les sols acides le phosphore peut être, en ayant des formes relativement disponibles, entraîné et perdu. Il est par contre très peu disponible directement en milieu basique.



Le rôle des organismes, créant des microsites d'acidité adéquate (p. 135), est très important pour permettre les échanges du phosphore en conditions limitantes. Des bactéries, des lombriciens et surtout des champignons (notamment symbiotes) facilitent la mobilité du phosphore qui s'échange ainsi entre formes insolubles (milieu basique) maintenues dans les roches sédimentaires (réserve), en phosphore organique (biomasse et nécromasse) et sous formes solubles lixiviables.

Outre les enrichissements en engrais des sols, l'usage de détergeants, utilisant presque autant (3/4) de phosphore que les engrais, entraîne un rejet surabondant de phosphore dans les eaux douces induisant dans certaines eaux une eutrophisation (croissance excessive de la phytomasse).

11 y a globalement entraînement du phosphore, surtout avec les organismes et sédiments. Cet appauvrissement étant en partie compensé par des exploitations massives (minerais, guano, pêche : engrais) et par les aérosols (fig. 2-21).

5. Autres cycles

A. Cycles du soufre

Le cycle du soufre est aussi important puisque cet élément est toujours associé à la vie, notamment au niveau de certains acides aminés essentiels, jouant un rôle important dans la structure des protéines et des enzymes. 11 présente certaines analogies avec le cycle de l'azote cet élément ayant soit des formes réduites, gazeuses (SH_2), soit des formes organiques ($-\text{SH}$) soit des formes oxydées qui se présentent, à l'extrême, comme un sel d'acide fort (SO_4^{2-}).

Le cycle du soufre joue un rôle clé dans les cycles des éléments chimiques associés à certaines bactéries particulièrement importantes dans une énergétique biologique non chlorophyllienne développée dans la porosphère immergée marine (p. 74).

B. Cycle de l'hydrogène et de l'oxygène

Nous avons été amenés, au cours de l'approche analytique par élément chimique, d'évoquer constamment le rôle du principal oxydant, l'oxygène jouent un rôle essentiel ($\text{O}_2 + 4\text{e}^- \longrightarrow 2\text{O}^{2-}$) avec le réducteur : l'hydrogène (fournissant l'électron ($\text{H}^- \longrightarrow \frac{1}{2}\text{H}_2 + 2\text{e}^-$)). Le mouvement de ces deux éléments est largement couplé dans l'écosphère sous forme d'eau H_2O (p. 121) et dans la matière organique. L'oxygène circule en outre sous forme gazeuse (O_2), et de certains oxydes gazeux (CO_2) ou liquides (NO_2) (p. 133, 165).

La facilité de leurs circulations est telle que l'oxygène n'est usuellement pas facteur limitant, sauf dans les milieux aqueux où cet élément est proportionnellement peu soluble (**tableau 2-2**, p. 168) et où les diverses réactions biophysicochimiques peuvent établir un état réducteur.

C'est notamment le cas dans les sols où la matière organique (carbone, azote, ..., réduits) de la nécromasse mais aussi de la biomasse (respiration des microorganismes et racines) crée des conditions globalement réductrices souvent observables visuellement (le fer, sous sa forme réduite (Fe^{2+} : sols verdâtres) ou olfactivement (dégagement putride de gaz réduits carbonés, sulfurés, azotés, NH_3 , SH_2 , CH_4 , ...). Ces conditions pouvant prévaloir à de très petites échelles, telles les conditions anaérobies à l'intérieur d'un agrégat de sol et l'extérieur étant aérobie et telles les conditions anaérobies à l'intérieur du nodule de symbiose *Rhizobium*-légumineuse qui ne pousse sur les racines qu'en conditions externes d'aérobiose.

L'hydrogène sous sa forme aqueuse est également facteur limitant dans tous les déserts arides à la fois comme élément nécessaire à la photosynthèse (p. 133) et comme solvant transportant vers les racines les autres nutriments.

C. Autres éléments

Les êtres vivants sont également dépendants de divers autres éléments chimiques (**tableau 2-1**, p. 117). Cela va du potassium jouant un rôle cationique essentiel (il s'agit d'un des trois éléments nutritifs majeurs puisés dans le sol par les

plantes) ou à l'iode, ayant un rôle clé dans les fonctions thyroïdiennes des vertébrés, ou au magnésium de la chlorophylle, ...

Par exemple, la silice migre dans la sève brute ascendante des plantes sous forme d'acide silicique et se dépose au niveau des organes aériens (où l'eau, le véhicule, s'évapore) pour précipiter sous forme de gel puis d'opale ($\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) en constituant des phylolithes pouvant représenter chez le hêtre 70 kg de ces "pierres de feuilles" recyclées avec les chutes de feuilles. Ce cycle de la silice dépend évidemment des espèces végétales et des conditions d'interactions physicochimiques et biologiques des sols, interfère avec d'autres éléments (Cu, Zn, Ee, Mn, ...) et joue un rôle dans l'écophysiologie végétale (résistance aux insectes suceurs notamment, rôle dans la régulation de l'évapotranspiration) (BARTOLI et SOUCHIER, 1978).

La disponibilité de ces éléments dépend de leurs formes moléculaires et peut devenir critique, mais à des quantités très variables. Leur fonctionnement dans les **écosystèmes** est également couplé à celui des autres éléments et à l'hémicycle énergétique.

2.5.5. L'hémicycle énergétique

Comme nous l'avons vu au paragraphe 2.3.1. l'énergie est le moteur de tout mouvement, et de tout changement d'état des écosystèmes et de leurs composants. A la différence des éléments chimiques, globalement stables et en permanence essentiellement recyclés, l'énergie est couplée à ces éléments mais est globalement dégradée, en tant que moteur thermodynamique des mouvements (p. 119) et changement d'état (p. 109).

L'énergie incidente au système est essentiellement solaire (avec une incidence négligeable de la géothermie). L'énorme apport d'énergie solaire est directement réémis par réflexion, ou absorbé par l'ozone, puis par l'air (transmission par connexion, l'eau, la surface au sol, ..., p. 113). Une infime fraction, dans le visible, est absorbée par les producteurs chlorophylliens et est à la base de la motricité des cycles biogéochimiques (fig. 2-2, p. 114 ; iig. 2-4, p. 120 ; fig. 2-7, p. 134).

La plus grande partie va donc servir de moteur aux cinésés de l'écosphère, aux vents, courants marins, etc. et permettre la température atmosphérique, hydrosphérique et porosphérique, c'est-à-dire les conditions vitales d'agitation brownienne, donc de réactivité (bio)chimique à la surface de la terre.

Il est à noter que l'énergie radiative est absorbée par différentes molécules tant dans l'atmosphère qu'à la surface du sol, ce qui change leur étal thermique (agitation). Puis cette énergie est réémise dans toutes directions dans une longueur d'onde dépendant de la température du réémetteur (p. 55) de sorte que les rayonnements pénétrant dans l'atmosphère et atteignant pour partie la surface du sol sont réémis depuis cette atmosphère (en toute direction) et du sol vers l'atmosphère... qui la retourne pour partie vers le sol. Il s'agit d'un "effet de serre" ayant pour conséquence d'élever la température terrestre. Sans cet effet de serre la température de la basse troposphère ne serait en moyenne que de - 18°C alors qu'elle est d'environ + 13°C (p. 115).

La température varie évidemment énormément selon l'angle d'incidence de la radiation solaire, donc avec la latitude, lu périhélie (mouvement relatif du soleil à la terre) et des différentes réflectances. L'albedo (= rapport de l'énergie réfléchie à l'énergie incidente) n'est pas le même pour la neige (pouvant atteindre 90 %) que pour le sol nu (20 % environ). Pour plus de détails voir RAMADE (1984) et E11RLICH *et al.* (1977).

Le couplage énergétique avec les molécules se fait surtout grâce à la photosynthèse (tableau 2-3, p. 168) recombinaut dans la biomasse les éléments biogènes, l'eau et le gaz. carbonique (p. 133, 156).

Les systèmes d'échange d'éléments chimiques ne sont jamais indépendants. La réduction de nombreux éléments C, N, H, ... écartant l'oxydant majeur O_2 s'accompagne d'une acquisition de liens chimiques énergétiques par assimilation

d'énergie radiative qui va être dégradée dans une succession d'altérations de réactions chimiques libres ou d'oxydoréductions exergoniques, biomoléculairement couplées (= êtres vivants) ou totalement perdue par le système sous forme de chaleur. Ce moteur des réactions, mû par la différence de potentiel d'énergie biochimique ainsi créée (p. 134), permet l'association de tout atome dans une organisation moléculaire souvent précise grâce à la structure héritée du temps juste antérieur (l-générateurs : p. 96).

Au cours de cette dégradation énergétique l'état général est de plus en plus oxydé, la vie est avant tout un système aérobie quoiqu'il n'y ait pas toujours parfaite continuité dans les étapes d'oxydation (par blocages, fermentations, ...). L'interférence de l'environnement sur le système réactionnel peut inverser le couple d'oxydoréduction. Celui-ci fonctionne généralement dans le sens Red (système bio-nécromasse)—*(Ox (environnement aérobie du système), pour s'inverser et devenir Ox (système nécro-biomasse)—Red en anaérobiose, par exemple dans le cycle de l'azote (P. 172).

2.5.6. Cycles, écosystémique et recherche opérationnelle formalisée

D'un point de vue opérationnel, l'écologue ne peut individuellement aborder l'étude d'un écosystème, beaucoup trop complexe, ni même celle du cycle total d'un élément. L'interprétation des résultats ponctuels, seuls accessibles à l'individu-chercheur, n'a de sens que s'il est remis dans leur contexte systémique : il y a contradiction opérationnelle entre l'aptitude de l'individu et la complexité du réel où se place son étude.

L'indispensable démarche synthétique, pouvant faire intervenir plusieurs spécialistes, revient à reconnaître les connexions systémiques entre plusieurs compartiments choisis par ces spécialistes ou identifiables par les mouvements isotopiques observés dans les écosystèmes réels. A ce stade, cette approche à la fois synthétique (additive) et objective (compartiment, état et cinèses concrets) reste quantitativement descriptive d'un système réel réduit à un élément chimique ; ce qui est déjà beaucoup. Ultérieurement, rien n'empêche de prendre en compte les nécessaires connexions de plusieurs cycles interférants, temporairement associés par molécules complexes chimio-énergétiquement.

Rien n'empêche de coupler, à ces morceaux du puzzle écosystémique que sont les compartiments étudiés en termes de portions de cycles, l'hémicycle énergétique, moteur des cinèses, soit par des mesures énergétiques directes (ici les difficultés techniques sont usuellement importantes) soit en tenant compte des niveaux d'oxydoréduction des entrées-sorties et des états compartimentaux.

Rien n'empêche enfin d'étudier les modifications d'état et de cinèse des portions écosystémiques décrites sous l'effet d'exnéats à ces systèmes qu'ils fussent mésonéats (température, hydricité, luminosité, broutement, ...) ou actes (apports d'engrais, effets de pesticides, récoltes, ...) (p. 96).

La formalisation, système par système, de chaque spécialiste peut être décrite par la modélisation des systèmes réels, étape par étape, dans le Processus Répétitif d'Accroissement des Connaissances de systémique (p. 357).

Toutefois, ces connexions systémiques sont complexes et obligent à une formalisation rationnelle. Elles impliquent des étapes d'élaboration des connaissances (acquisition, gestion, synthèse et réfutabilité) opérationnellement décrites en deuxième partie.

Elles portent essentiellement sur les écosystèmes (p. 157) actuels qui se prêtent aisément à mesure et contrôle. Beaucoup plus délicate est la reconstitution de leur passé, ayant conduit à l'actuel, et que nous abordons maintenant.

2.6. L'évolution

2.6.1. Transformation diachronique des systèmes écologiques

Confrontés à la diversité des systèmes écologiques, à la merveilleuse organisation des êtres vivants, et convaincus de leur supériorité, les hommes ont eu une vision anthropocentrique de ces systèmes.

Cette vision est si déformante, et les moyens d'étude de ces systèmes complexes jusqu'à récemment si limités, qu'il a fallu (qu'il faut encore) un effort d'observation et de conception particulièrement objectif pour accepter de décrire ces systèmes écologiques pour ce qu'ils sont et non pour ce que l'on en dit culturellement.

Heureusement les propriétés de la matière, dont les interactions physiques, ont valeur générale. Elles gouvernent les systèmes physicochimiques, dont les sous-systèmes biologiques ne sont qu'une particularité remarquable, mais nullement singulière (p. 75). L'évolution cosmologique du système solaire, et plus précisément de la partie superficielle de la terre, inclut l'évolution de l'écosphère et celle des sous-systèmes abiotiques et vivants. L'écoulement du temps et les échanges énergétiques obligent au fonctionnement des systèmes terrestres, y compris superficiels et entraînent des transformations diachroniques de tous les systèmes : il y a évolution (p. 46).

Cette transformation se fait par la confrontation de deux types d'aléas, c'est-à-dire de situations accidentelles (Gg. 2-22).

Le premier type d'aléas provient de l'entour (exnéats), y compris les actes socio-économiques et l'évolution cosmologique générale, et se traduit au niveau local par des modifications lentes (dérives continentales, transgressions marines, évolution macroclimatique, ...) accompagnées de paroxysmes "brutaux" (extrêmes climatiques, feu, glissement de terrain lié à l'orogénèse, ...).

Ces accidents perturbant le fonctionnement des écosystèmes "obligent" les organismes, inclus dans ces écosystèmes, à une reproduction en excès pour combler les pertes ou/et exploiter les opportunités accidentelles. Il y a en conséquence nécessairement surpopulation (reproduction en excès comblant ces accidents) par rapport aux capacités "normales" d'accueil du milieu.

Le deuxième type d'aléas tient au caractère instable - voire à la complexité - des systèmes écologiques abiotiques ou vivants qui peuvent se modifier dans leur organisation à travers le temps de façon graduelle ou brutale (par franchissement d'un seuil critique). Ce deuxième type d'aléas touche, par exemple, les organismes au niveau des modifications aléatoires de transcription des codes génétiques (p. 80). Ces anomalies (= mutations) conduisent à des descendants, différents des parents, qui sont sélectionnés (adéquats ou/et inadéquats par rapport au milieu). Les pertes pour cette inadéquation doivent aussi être compensées par une surpopulation.

Les systèmes biologiques ont la propriété d'une organisation continue dans le temps et reproduite. L'adéquation des individus à leur milieu (= leur adaptation) permet leur maintien, donc leur propre reproduction. Le fait de constater cette continuité Vitale temporelle à travers les générations a pour corollaire la surpopulation en raison des aléas décrits ci-dessus. La transformation temporospatiale des systèmes écologiques, eux-mêmes très divers, ne garantit pas que les conditions qui se développent auprès de chaque sous-système biologique permettent le maintien fonctionnel ; il y a mort, retour à l'état simplement physicochimique (sans homéostasie), lorsqu'il y a inadéquation. Seuls les vivants assurent la continuité vitale et donc se reproduisent : c'est la "sélection naturelle".

Ainsi les aléas touchent les deux formes incidentes aux systèmes biologiques : les exnéats et les innéats (p. 96) qui à l'instant suivant induisent, via le système biologique survivant, des généraux. Les deux types d'aléas impliquent tous deux une reproduction en surpopulation qui engendre des organismes en excès, vivant en

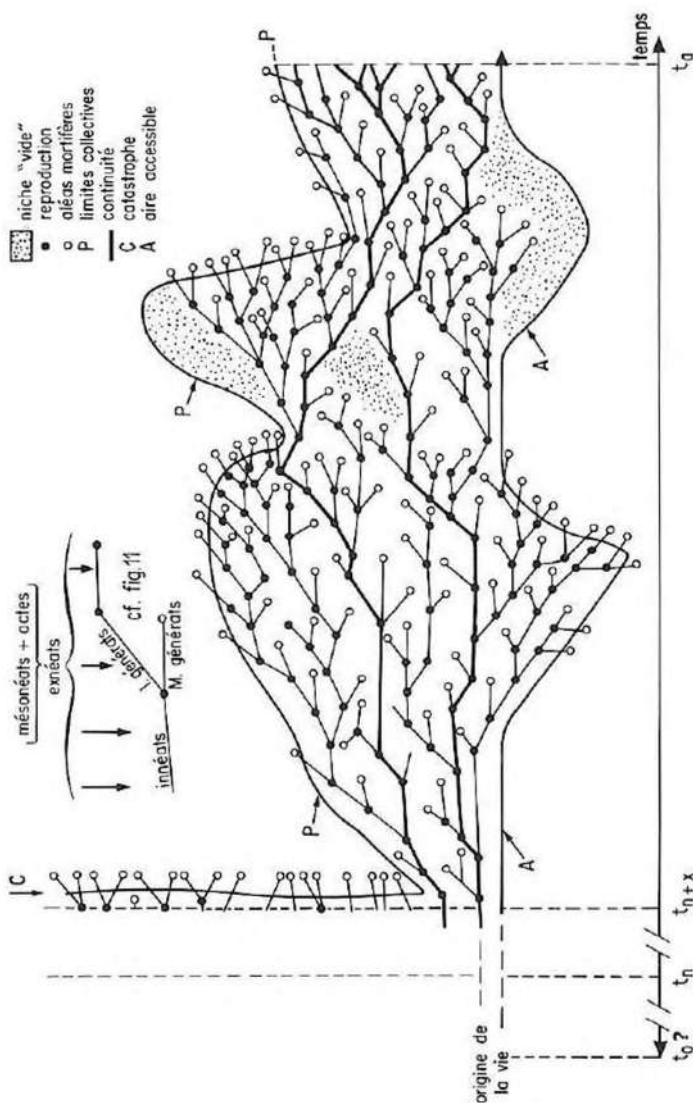


Figure 2-22 - Schématisation de la continuité vitale pendant une courte période entre $t_n + x$ et le temps actuel (t_q). La reproduction est ici schématisiquement simplifiée par une duplication sans recombinaison génétique ni pullulation (descendants par centaines ou milliers). En permanence, le système hérite de ses propriétés antérieures et subit les contraintes des limites de l'aire (A) et, dans celle-ci, de la place (P) dans laquelle les compétitions intraspécifiques s'exacerbent sauf expansion de P oulet A. $A =$ catastrophe locale. Les possibilités de reproduction compensent à peu près les possibilités d'expansion et les pertes individuelles pour inadéquation au milieu (monstruosité, stérilité, ...). Lorsque $t_n - t_{nx}$ est très grand, il y a possibilité d'importantes modifications phylogénétiques (du procaryote au chène ou à l'homme). $t_0 =$ premiers êtres vivants.

compétition en parallèle (p. 70). Cette compétition accroît encore la qualité des ajustements organismes/milieu, c'est-à-dire la cohérence systémique (p. 218) ou l'intensité et la permanence relative des cinèses organismes-milieu.

Ces sous-systèmes biologiques s'inscrivent nécessairement dans leur système d'échange car ils ne sont que sous-systèmes des systèmes biophysicochimiques où ils vivent. Transformation, adaptation, évolution sont inhérentes à l'état même des systèmes écologiques, dont les êtres vivants dans leur milieu. Les organismes dépendent de leur situation systémique ; en aucun cas, ils ne sont indépendants des systèmes écologiques (biophysicochimiques) auxquels ils appartiennent (chap. III).

C'est à partir de l'état présent des systèmes que l'écologue peut reconstruire par la pensée (= imaginer) le "passé" ayant conduit à l'état actuel. Seuls les systèmes actuels, totalement descriptibles dans leurs états et cinèses, nous sont accessibles.

Toutefois les systèmes antérieurs nous ont laissé des éléments dont la transformation (= changement d'état en fonction du temps) est lente. Ainsi les fossiles, les bassins de houille, les roches métamorphiques ou sédimentaires, les images interstellaires qui ne nous parviennent qu'aujourd'hui, sont des témoignages peu transformés du passé ; ils nous donnent une information peu biaisée des caractéristiques des systèmes passés (p. 352).

Encore faut-il que ces données historiques appartiennent à un même système dans les trois référendaires du champ écologique (composition, espace, temps). Le temps fait particulièrement problème, par son imprécision relative, mais aussi par la non-concomitance des éléments supposés de la même date. En complément de cette information "fossilisée", peu transformée, donc largement attribuable à une époque antérieure, on peut essayer de supputer (p. 346) les étapes conduisant à l'état actuel. Le fait que les états actuels soient issus des états antérieurs, que les systèmes actuels reçoivent des innéats, permet de reconstituer les innéats antérieurs à partir des systèmes actuels. Cette supputation évolutive sur les états antérieurs implique, en toute rigueur, une connaissance des systèmes actuels.

La conséquence, par exemple, du fait que les organismes dérivent mutuellement des uns des autres et se présentent égaux dans leur vie actuelle, mais divers dans leurs formes-fonctions, constitue un objet de supputation sur les voies antérieures ayant conduit à la situation présente (p. 251).

A côté des états fossilisés et des supputations sur les étapes vers l'état actuel, il est aussi possible de tenir compte des causes actuelles dans la courte période du champ écologique accessible à l'acquisition de données. En termes de biologie ou d'écobiologie, il s'agit de la micro-évolution. En fait, il s'agit de l'aptitude que nous avons à observer directement la transformation des systèmes biologiques et donc la possibilité, même limitée, à observer leur adaptabilité. Encore faut-il que ces études prennent en compte le système écologique où les organismes s'inscrivent, pour connaître l'objet de leur adaptation et qu'elles ne fassent pas que l'évoquer comme une potentialité (p. 31).

2.6.2. Les échelles de temps

Les trois sources de connaissance (fossiles, causes actuelles et supputations) permettent de comprendre le passé des systèmes écologiques. Les deux premières relèvent d'observations factuelles ; la dernière de déductions "logiques" qui s'appuient notamment sur l'indispensable continuité vitale.

Les deux premières, étant factuelles, sont des données écologiques qui, comme les autres, rentrent dans les modalités d'acquisition d'informations classiques (chap. IV, V) ; à la difficulté près que les variables associées aux domaines temps (espaces et composition) sont attribuées *a posteriori* dans le cas des informations fossilisées ; cette attribution, étant une interprétation (chap. VI), n'interfère toutefois pas sur les Données Initiales Contrôlées (DICs), tel le rapf $\rightarrow$ rt $^{4}\text{C}/^{12}\text{C}$.

Les supputations sur les états antérieurs se font à partir de l'actuel et les transformations observables actuellement se rapportent aux référendaires espace, temps et composition. Ces supputations sur le passé ne permettent une réfutation

scientifique que grâce au recoupement par des informations fossilisées correctement datées (p. 351).

Les échelles de temps sont fort différentes. Les transformations observables, le sont sur quelques années, parfois dizaines d'années, alors que l'information "fossilisée" porte sur des milliards d'années.

La datation est relative lorsque l'on peut affirmer, par divers arguments (tel le dépôt successif des fossiles dans les couches sédimentaires), que tel état est antérieur à tel autre. Elle est absolue lorsque l'on peut rattacher l'objet étudié à une date calendaire. Ceci peut se faire à partir du présent par la lecture de processus cumulatifs permettant de reconnaître les phénomènes saisonniers de chaque année (dépôts des varves ou sédiments lacustres, cernes de croissance des troncs d'arbres, etc.) ou encore en ayant un processus physique fonction du temps et indépendant des interactions, particulièrement la désintégration isotopique des interactions faibles (p. 61). Ces datations impliquent que l'objet étudié soit bien un fossile et n'ait pas, vis-à-vis des variables étudiées, été transformé (remanié, contaminé, etc.). La précision des lectures chronologiques est affectée de l'imprécision des méthodes de mesure et d'une erreur d'adéquation résultant des remaniements du matériel étudié. Ces erreurs (p. 288) sont généralement d'amplitude proportionnelle à l'âge et sont donc, dans l'étude historique, croissantes avec celui-ci, de sorte que la concomitance des événements devient difficile avec le recul dans le temps.

Dans cette échelle de temps, il apparaît que la biosphère -donc l'écosphère- s'est différenciée à partir de $- 4,7.10^9$ années, mais que les sédiments, nous laissant des fossiles pluricellulaires, remontent à $- 7.10^8$ ans seulement (= précambrien). Notre information s'amplifie fortement à partir du primaire ($- 570.10^6$ ans), encore plus depuis le secondaire ($- 225.10^6$ ans), le tertiaire ($- 65.10^6$ ans) et le quaternaire ($- 3.10^4$ ans). La période glaciaire ($- 10\ 000$ ans) rejoint les périodes historiques où les informations deviennent directement accessibles par nos méthodes d'acquisition.

2.6.3. Réfutabilité des hypothèses évolutionnistes

Les supputations à partir de l'actuel sont des hypothèses d'un usage courant, par exemple en pédologie pour expliquer la pédogénèse (= développement du sol) ou en biologie pour les phylogénèses (= généalogie des taxons actuels, p. 261). Il faut pouvoir les contrôler. L'étude des mécanismes potentiels du passé peut éventuellement se faire sur les transformations observables et - en supposant depuis LAMARCK (1799) que les causes actuelles ont joué dans le passé - étayer les mécanismes évoqués dans les supputations (idées reprises en Europe au cours du XIX^{ème} siècle entre autres par LYELL (1832, 1838), Darwin (1859), cf. LAURENT (1987)). Le contrôle peut se faire sur des informations fossiles si celles-ci recoupent les prédictions. Le contrôle scientifique peut se faire et doit donc se faire (p. 351).

Malheureusement, ces états fossiles pouvant eux-mêmes faire l'objet de suppositions diverses et la diversité des sources d'informations isotopiques, chimiques, biochimiques, morphologiques, accessibles est grande... mais parcellisée par les approches diversifiées de disciplines variées. En conséquence, les constructions hypothétiques abondent. Nous y trouvons les difficultés classiques de l'interprétation écologique (p. 42) avec en plus, une dimension temporelle considérable et très floue. Leurs tautologismes et opportunistes tiennent souvent lieu de démonstration. Les prédictions testables devraient alors jouer un rôle essentiel et constituer assurément une préoccupation centrale dans ce type d'interprétation.

Cela n'empêche pas, indépendamment et hors du domaine des démarches scientifiques réfutables, de brosser de façon spéculative des panoramas contribuant à l'histoire naturelle qui <<envisage "l'histoire de la création naturelle">> (E. Haeckel, p. 23).

Si la reconstitution historique hypothétique est effectuée, il est possible parfois de vérifier la validité de ses reconstitutions grâce à des fossiles... mais tous les

groupes n'ont pas de fossiles. Ainsi, les Annélides n'en ont usuellement pas ; toutefois leur importance dans le fonctionnement des écosystèmes semble être marquée depuis longtemps (- 680.10^e années) comme l'atteste *Marywadea* à Ediacara, Australie, un annélide qui creusait ses galeries dans les sédiments marins où il s'est exceptionnellement fossilisé.

La découverte fortuite (pour édition cartographique) de la non cohabitation des sous-espèces de *Scherotheca* a conduit à en rechercher la cause dans la biogéographie, puis la paléogéographie (BOUCHE, 1972) (fig. 2-23). En fait, la migration en Oorse d'espèces différenciées au Miocène (- 13.10⁶ ans) sur le continent faisait problème en 1972 aux yeux de géologues (absence de liaison émergée depuis cette époque).

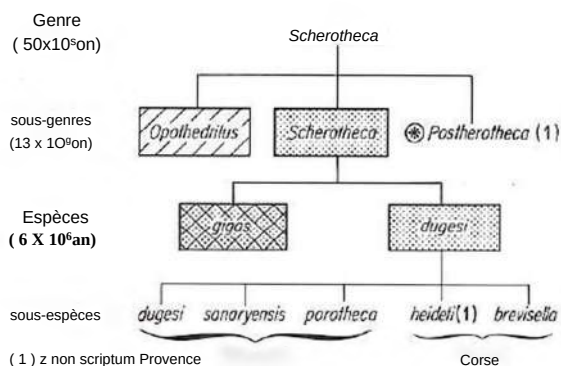
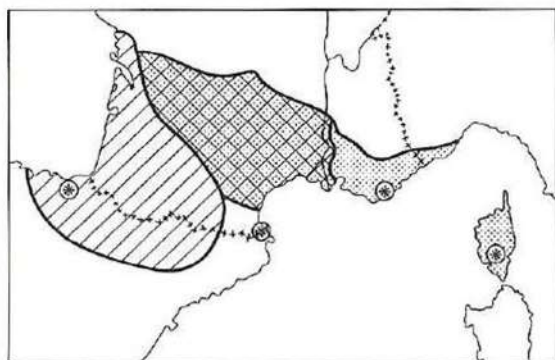


Figure 2-23 - Les reconstitutions phylogénétiques, fondées sur la morphologie, proposent une hiérarchie généalogique hypothétique impliquant une chronologie parentale des ascendances (les sous-espèces sont dérivées des espèces qui dérivent d'un ancêtre commun ou sous-genre puis genre). L'occupation des aires est une autre information objective indépendante et les relations paléotectoniques, une troisième source d'information donnant une chronologie des relations spatiales des aires émergées. La coïncidence de la répartition actuelle des divers taxons de *Scherotheca* avec la biogéographie, et la paléogéographie (datable) témoigne de l'occupation successive des territoires et de la validation de l'hypothèse phylogénétique (Corse, Maures et Pyrénées ont formé un ensemble ancien au début du Tertiaire, puis il y a eu connexion avec le Massif Central, ensuite avec les Alpes et enfin la Corse) (Bouche, sous presse).

De même, la conformité des aires actuelles de ce groupe taxonomique avec les continents reconstitués par WEGENER (1920) avait été montrée (MICHAELSEN, 1922) puis ensuite rejetée en raison de l'abandon de la théorie de la dérive des continents.

Dans l'un et l'autre cas, l'adoption d'une explication opportuniste "géologique" (p. 42) a poussé à écarter une interprétation fondamentalement correcte. Nous verrons, p. 352, que sur cette même problématique, il est possible de prédire des conséquences réfutables.

En fait, pour l'écologie, il serait plus intéressant de ne pas s'appuyer que sur les fossiles d'organismes mais aussi sur toutes les informations fossiles ayant trait à l'état possible des écosystèmes, notamment les paléosols (BOUCHE, 1983), pour reconstituer non seulement les paléobiocénoses mais plus généralement les paléoholocénoses.

2.6.4. Evolution des domaines écologiques : genèse des systèmes actuels

L'évolution a porté sur des systèmes écologiques. Quel que soit l'objet étudié, celle-ci s'inscrit simultanément dans les trois référendaires du champ écologique, le temps, l'espace et la composition. Ces trois référendaires reflètent des situations impliquant :

- 1) une évolution, définie comme transformation diachronique, ne pouvant revenir en arrière, le temps s'écoulant,
- 2) des modifications de composition en fonction du temps, nécessairement exergoniques. Si un état physicochimique peut se reproduire dans le temps (= être similaire à t_1 et t_n), c'est au prix d'une non fonction du système (fossilisation) ou d'une dépense énergétique assurant soit une maintenance d'un système ouvert ou/et, après une transformation, un retour à l'état initial assuré par reproduction,
- 3) que tout déplacement dans l'espace est lié à une dégradation énergétique, le frottement s'opposant aux cinèses et les cinèses aboutissant à des transformations.

Les innéats s'opposent à la modification du système : seuls, il y a fossilisation.

Les exnéats permettent le changement : seuls, ils créent le système.

Tous les systèmes écologiques sont le reflet de cette ambivalence. Certains à cinèse extraordinairement lente (roche) sont bloqués et sont comparativement quasi-constants et sans fonctionnement. A l'inverse, les systèmes labiles sont modifiés en permanence sous l'influence d'exnéats dominant les innéats. Certains systèmes apparaîtront comme très peu évoluants (= transformés en fonction du temps) lorsque leurs innéats, ayant essentiellement atteint des états stables, ne sont soumis, que de façon limitée, aux exnéats.

Décrire, ou plus exactement essayer de reconstituer la genèse des systèmes actuels, tiendra donc essentiellement compte de la filiation possible entre systèmes "recevant" au temps t , d'une part une matière-énergie, comme structure fonctionnelle depuis son état au temps $t-1$ et d'autre part des facteurs externes qui modifient nécessairement peu ou prou le système étudié entre ces deux dates ($t-1$ et t) (p. 95).

L'information écologique (p. 88) ne se transmet à travers le temps que par la constance de certains éléments qui, par la structure relativement permanente qu'ils assurent, imposent un ordre, une organisation, aux systèmes écologiques.

En fait, ces structures (méta)stables jouent leur rôle physicochimique avec constance : ce sont des innéats (semi)permanents. Dans l'écosphère les mouvements se font avec les fluides (qui peuvent entraîner des solides) et les blocages par des solides. La partie solide de l'écosphère comporte deux éléments, les êtres vivants (biosphère) et l'abios solide, c'est-à-dire essentiellement la phase solide de la porosphère. La première est étudiée par la biologie (dont l'écobiologie, chap. III), la seconde par la pédologie et la minéralogie (qui ne prennent qu'accessoirement en compte les êtres vivants dans l'étude du sol, p. 130).

L'importance des états antérieurs sur les états actuels est telle que la filiation des uns à partir des autres peut être retracée dès qu'il y a une phase solide. On parlera de pédogenèse pour la formation des sols à travers le temps, de minéralogenèse pour la constitution de roches de la lithosphère et de phylogenèse pour la formation de l'état actuel des formes vivantes. Les systèmes écologiques ne "conservent" pratiquement de leur passé que ces structures métastables (CLEMENS, 1916 in FISCHER, 1972) de sorte que la paléo-écologie reconstitue les paléosstructures et suppose les paléofonctionnements des paléosystèmes écologiques à partir de leur identité relative avec les systèmes actuels.

2.6.5. Stabilité et évolution complexifiante de sous-systèmes biologiques

Tout être vivant est issu d'êtres vivants qui le précèdent, ou plus exactement tous les êtres vivants forment un continuum dans le temps et sont discontinus dans l'espace, car un être vivant est issu de ses "parents" sans arrêt chronologique de la vie : les gamètes (ovules, spermatozoïdes), les diaspores (graines, larves) sont des êtres vivants et il y a une continuité vitale entre le premier organisme ayant pu se maintenir... jusqu'à nos jours (fig. 2-22, p. 178). Inversement, chaque individu est une entité discontinue par rapport à l'espace (essentiellement abiotique) pour des raisons de surface d'échanges systémiques (p. 82).

Pour des raisons thermodynamiques (systèmes ouverts devant, échanger, p. 80) cet organisme unique s'est scindé en de multiples individus et la totalité des êtres vivants actuels ont continuellement dérivé de cet ancêtre commun sans que l'organisation vitale cesse.

Nous avons vu, au paragraphe 1.6.4., que le maintien de l'homéostasie des systèmes biologiques dépend des régulations métaboliques à partir du code ADN. La réplication de ces codes en copies permet la reproduction, c'est-à-dire l'obtention d'autres individus identiques, aux erreurs et remaniements près de leur information génétique et aux sélections dues au milieu.

Si la vie est un continuum, tous les individus reproduits ne peuvent survivre puisque la maintenance même de la vie implique leur surpopulation (p. 177). Seuls ceux en harmonie fonctionnelle suffisante avec leur environnement peuvent assurer cette permanence à travers le temps. La reproduction des codes ADN par copie constitue fondamentalement le mécanisme assurant la permanence de la vie, mais cette reproduction est pour diverses raisons perturbée et peut de ce fait être "imparfaite" de sorte que le reproduit (le descendant) peut ne pas être identique au reproducteur (l'ascendant ou parent) et un même parent peut successivement reproduire des descendants différents. Cette "imperfection" est en fait le moyen d'une adéquate (adaptation) permanente des organismes à leur système écologique (milieu), lui-même instable, par une permanente transformation adaptative : il y a continuité vitale évolutive.

Ce mécanisme introduit la diversité des sous-systèmes biologiques, mais aussi la cohérence (connexité) de ces sous-systèmes avec les systèmes écologiques qui les incluent, et oblige à l'élimination des organismes inadéquats : c'est la sélection. Cette sélection est dite naturelle si les mésonéats interviennent seuls et artificielle si en outre des actes jouent un rôle.

Cette sélection porte, via les individus, sur les gènes ou séquences d'ADN aboutissant, via l'ARN, à une protéine catalytique ou enzyme et sur les diverses variantes de ce même gène (p. 80). Les différentes formes d'un même gène sont appelées allèles. La sélection des individus est un moyen de conservation ou d'élimination des génomes constitués des gènes. Il s'agit d'une réponse à la relation organisme-milieu en tout ou rien : interruption ou non de la continuité vitale.

Toutefois la complexité des protéines, dont un site de la structure tertiaire est seul actif, montre que les modifications alléliques aboutissent la plupart du temps à des protéines non fonctionnelles, ou parfois encore fonctionnelles mais de façon voisine de la forme la plus répandue (l'allèle le plus conservé par la sélection)... Peu à peu un allèle plus adéquat peut arriver à supplanter un autre, notamment lorsque le milieu est modifié (cas du mimétisme) : il n'y a pas création de fonction nouvelle mais simple optimisation de celle-ci. Comme le remarque justement Ollino (1980), la sélection a avant tout un caractère conservateur en assurant la primauté des organismes adéquats à l'évolution de leur système écologique. La lente évolution de ce système peut entraîner corrélativement une évolution graduelle des organismes inclus dans celui-ci.

Toutefois, deux approches (les causes actuelles et les supputations évolutives) nous montrent indépendamment que la sélection a surtout un rôle conservateur (de l'adéquation systémique) alors que l'évolution biologique s'est faite par de remarquables transformations et notamment par addition d'aptitudes (décrites ci-dessous sommairement).

1°) Les transformations, observables actuellement, sont l'objet de "manipulations" humaines depuis 3 000 à 5 000 ans. L'homme, entreprenant l'élevage et l'agriculture, n'a pris soin et n'a sélectionné artificiellement que les organismes nécessaires à ces besoins et se prêtant à ses techniques. L'éleveur fier de son troupeau a conservé les "plus beaux" géniteurs et l'horticulteur d'Ile-de-France a longtemps tiré partie de ses oignons en sélectionnant les plus beaux comme "porte-graines". Ces pratiques, ces actes sélectifs, remontent à des périodes proto-historiques... Toutefois pendant ces 3 à 5 millénaires, jamais l'homme n'a créé une espèce ; les divers choux de Bruxelles, choux-fleurs, brocolis, choux pommés verts ou rouges, ne sont que les variantes "alléliques" de la même espèce. La modification du milieu (par les actes sélectifs humains) n'a pas créé sur une longue période une seule espèce connue.

On peut certes penser que la période (10^3 ans) est très petite face à l'échelle évolutive (10^{11} ans) et que la poursuite de cette sélection artificielle arriverait à une authentique spéciation.

2°) L'autre approche possible (par supputations évolutives) conduit à la même conclusion. Les protéines et tout le système ADN - ARN qui conduit à elles, sont trop complexes pour permettre un changement de fonction de ces protéines. La sélection porte sur l'ajustement des fonctions avec le milieu mais pas sur la création de fonctions nouvelles. Il faut que des gènes nouveaux, sous-tendant des fonctions totalement nouvelles (non pré-existantes), soient créés pour expliquer l'évolution.

Par exemple, l'acquisition de la fonction chlorophyllienne, faisant appel à des systèmes complexes ne peut avoir été sélectionnée avant son existence. Seule après son "innovation évolutive" l'optimisation de cette fonction a pu avoir lieu. Pour créer de nouveaux sites actifs sur les protéines, il faut que bien des variantes, temporairement "inutiles", aient pré-existé car ce changement ne doit pas supprimer une fonction importante antérieurement.

2.6.6. Sélection, innovations et duplications

Les considérations précédentes conduisent à distinguer d'une part une adaptation micro-évolutive où la continuité permet une lente optimisation des aptitudes pré-existantes par simple modification de proportions alléliques et d'autre part, des innovations apportant des propriétés radicalement nouvelles.

OhNO (1970) a souligné l'importance de la duplication des gènes, sur un même individu, un gène fonctionne traditionnellement tandis qu'un autre, initialement semblable car reproduit en excès dans le même individu, peut se transformer et produire des protéines inopérantes sans un gros inconvénient (sauf le détournement matière-énergie ainsi effectué). Ce gène surnuméraire et inopérant, initialement doublé d'un gène indispensable, sera reproduit dans la descendance malgré son "inutilité" pour les organismes porteurs. Par exemple, pour la bêta-globuline, protéine de 145 acides aminés, il faut pour la coder un gène utile minimum de $3 \times 145 = 435$ nucléotides ; la grandeur réelle de ce gène est de 5 000 nucléotides.

Tout un processus biochimique élimine, après copie en ARN (p. 81), les nucléotides surnuméraires ; les parties "utiles", dénommées introns sont raccordées mutuellement, tandis que les parties surnuméraires (— exons) sont excisées. Toutefois des gènes entiers, surnuméraires, existent effectivement. Inutiles, ils n'en mutent pas moins et souvent sans conséquences graves pour l'organisme puisque le gène d'origine fonctionne en parallèle.

S. OHNO (*op. cil.*) insiste sur le fait que ces gènes surnuméraires peuvent ainsi créer accidentellement de nouvelles fonctions et expliquent les changements de fonction de protéines structurellement proches les unes des autres : la filiation fonctionnelle des gènes a pu même, en certains cas, être mise en évidence. Les variantes alléliques de la même fonction protéique portent souvent sur la partie non fonctionnelle de la protéine ; les mutations portant sur cette partie affectent peu ou pas la fonction initiale du gène.

On trouve ici un mécanisme évolutif beaucoup plus général : la duplication fonctionnelle innovante, une molécule ou un organe assurent la continuité vitale tandis qu'en parallèle un double, au rôle marginal ou nul, évolue sans sélection car sans fonction délétère ou positive. Ultérieurement, ce double met en fonction une innovation à propriété additionnelle nouvelle. Les grandes "innovations" biologiques tant au niveau biochimique qu'organique semblent s'être effectuées ainsi.

Ce serait ainsi cette duplication fonctionnelle innovante qui expliquerait au niveau biochimique la création de la fonction nouvelle "transport de l'oxygène" par l'hémoglobine dans le sang. Chez les vertébrés, les polypeptides (= séquences d'acides aminés) constitutifs des diverses hémoglobines ont une homologie structurale avec la myoglobine, polypeptide unique commune à ces animaux, dont la fonction physiologique est radicalement différente (stockage d'oxygène dans les muscles). Cette homologie, à partir d'une polypeptide commune (la myoglobine), des diverses variantes d'hémoglobine permet de parler d'une "lignée évolutive" des gènes codant ces polypeptides (OHNO, 1980). Aujourd'hui de nombreuses études utilisent ainsi les homologies des séquences d'ADN, ARN ou de protéines pour reconstituer ces évolutions qui peuvent n'être que des microévolutions ou des innovations radicales impliquant une duplication fonctionnelle. La fonction hémoglobine ne s'est pas substituée à celle de la myoglobine mais ajoutée à celle-ci, puis perfectionnée.

Ces duplications au niveau de la biochimie génétique recouvrent des modalités diverses (le processus d'excision décrit plus haut, la polyploïdisation ou multiplication du stock génétique dans une même cellule, ...).

Ces duplications fonctionnelles ne s'observent pas qu'à l'échelle moléculaire mais aussi à celle des organes, voire de l'"unité de composition organique", pour reprendre la vieille expression de GEOFFROY STHILAIRE (1820), c'est-à-dire celle de la cohérence de l'organisme entier.

Les spéculations sur les relations phylétiques des organismes portent justement sur la cohérence des enchaînements ayant conduit aux formes de vie actuelles et font référence à des interprétations présentées souvent comme conflictuelles (p. 253).

Un bon exemple nous est fourni par l'étude ontogénétique des embryons de mammifères qui montre que deux osselets constitutifs de leur oreille interne sont les homologues des deux os assurant l'articulation de la mâchoire chez les reptiles, leurs ancêtres. Cette interprétation fut souvent rejetée car on imaginait mal un abandon de la mastication et la surdité chez les ancêtres assurant la transition entre reptiles et mammifères... La réponse fut apportée par un fossile ayant une duplication fonctionnelle évolutive : *Diarthrognathus* qui, comme son nom l'indique, possède une double articulation (2 articulations en parallèle pour chaque demi-machoire) : les os initialement masticateurs pouvaient ultérieurement perdre cette fonction pour une autre affectation, le relai étant pris par le duplical.

Cette transposition d'organe pour des fonctions différentes (masticatoire et auditive) par duplication fonctionnelle peut aller jusqu'à toucher l'"unité de composition organique". C'est le cas de la profonde réorganisation des lombriciens terrololes entre les Lumbricidae-Diporodnidae d'une part et les autres lombriciens qui s'explique par la mise en place du fonctionnement "en parallèle" de deux systèmes de gésiers encore visibles chez *Hormogaster praetiosa* (Mich., 1899) permettant une refonte de l'ordonnance de organes sexuels et somatiques (BOUCHE, 1970, sous presse).

Tout porte à penser que la sélection permet la cohérence des organismes avec leur système écologique. Elle est surtout conservatrice, cette cohérence suivant la lente évolution de ces systèmes. Par contre, l'acquisition de certains traits profondément nouveaux implique, à côté d'une fonction maintenue et cohérente..., une duplication fonctionnelle innovante qui peut dériver, en situation transitoire, sans grande conséquence, vers une innovation apportant des propriétés radicalement nouvelles.

Cette duplication fonctionnelle, qui peut être multiplication (chromosomique, cellulaire, métamérique, ...) serait le moyen des profondes innovations.

Les duplications fonctionnelles conduisent à l'organisation pluricellulaire typique des plantes et animaux. Ces associations pluricellulaires permettent évidemment une diversification des fonctions des cellules d'un organisme très complexe non seulement synchroniquement (un organisme ayant souvent des millions de cellules) mais aussi diachroniquement au cours de l'ontogenèse faisant passer de formes monocellulaires souvent haploïdes (un seul code génétique) au stade diploïde par fusion (reproduction sexuée) voire polyplôïde pluricellulaire (nombreux génomes en parallèle, accroissant la duplication génétique) avec de nombreuses écophases, parfois en stades marqués (p. 212).

Autre innovation, sans lien avec une duplication fonctionnelle, l'endosymbiose qui serait la plus importante, car à l'origine des eucaryotes. Elle résulterait d'organismes ayant, après une longue évolution divergente de fonctions, fusionné, via la symbiose, en raison de la complémentarité de leurs aptitudes (p. 188).

Ainsi les organismes acquièrent peu à peu des propriétés radicalement nouvelles (= des innovations) ; celles-ci peuvent toucher, au niveau des procaryotes (les organismes les plus simples) essentiellement les régulations fonctionnelles. Avec les eucaryotes il y a une complexité fonctionnelle beaucoup plus grande conduisant au développement non seulement d'une organisation génétique complexe (l'essentiel, mais non la totalité des gènes étant dans le noyau) et il y a existence d'une structure interne à la cellule canalisant les diverses molécules dans la "solution cellulaire" grâce à un cytosquelette (squelette intracellulaire).

Ces organismes acquièrent aussi souvent une organisation très sophistiquée de reproduction. A côté des simples échanges d'ADN (qui existent chez les procaryotes) se met en place, avec la reproduction sexuée, le brassage systématique des génomes permettant la diffusion non seulement des mutations mais aussi leur combinaison mutuelle entre individu de la même espèce (= recombinaison ces génomes lors de la reproduction sexuée).

En définitive, si la sélection opère toujours une élimination des inadaptés à leurs systèmes écologiques, les innovations tendent à partir d'un état ancestral plus simple, à additionner des propriétés. Ces propriétés vont encore être accrues lorsque les cellules se divisant resteront associées en se spécialisant pour former un organisme pluricellulaire. Celui-ci deviendra peu à peu de plus en plus complexe à la fois au niveau d'un individu, qui peut se dupliquer répétitivement en métamères (dont l'archétype est illustré par les annélides) et deviendra multiforme (telle une pieuvre, un homme ou un palmier) mais également dans l'ontogénèse.

Cette complexité des pluricellulaires permet la différenciation organique porteuse d'innovations profondes qui exigent cependant la continuité vitale. La somme des duplications fonctionnelles conduit à l'accroissement de la complexité.

Cette augmentation de complexité, au cours de l'histoire biologique, se fait par l'intégration morphofonctionnelle de propriétés, qui se paie au prix de cette complexité mais qui permet une plus grande homéostasie (= indépendance relative vis-à-vis des aléas du milieu). Ces deux propriétés liées (homéostasie au prix de la complexité) expliquent qu'aujourd'hui cohabite une diversité biologique où les formes simples côtoient les complexes (p. 206).

2.6.7. L'évolution biologique et la spéciation

Un individu est porteur d'un code génétique qui assure sa régulation au sein d'un système biophysicochimique plus général auquel il appartient. Sa cohérence en tant que compartiment avec le milieu lui permet, au moins sa maintenance, au mieux sa croissance et sa reproduction ou sinon, par dysfonctionnement, sa mort. C'est dans ce système (individu/milieu) qu'opère la sélection.

La plupart des organismes échangent et recombinent leur code génétique, de génération en génération, ce qui augmente la diversité des combinaisons des caractéristiques physio-morphologiques de ceux-ci. Cette recombinaison permet dans une population locale de soumettre des codes génétiques variés à l'épreuve de l'adéquation systémique avec le milieu.

Il y a entre gènes (code génétique biochimique) et aptitudes externes (système individu/milieu) de l'individu porteur une complexité considérable d'interactions. La description exhaustive des mécanismes liant code, milieu et probabilité de continuité vitale est exceptionnellement possible (e.g. dans le cas de tares congénitales) (p. 234). Il est toutefois statistiquement indispensable que pour leur survie (continuité vitale) les caractéristiques des individus soient globalement cohérentes avec leur milieu. Avec l'évolution du milieu en un lieu donné (p. 183), il y a nécessairement lente modification génétique des caractéristiques biologiques en cohérence avec l'évolution des systèmes écologiques où ils s'inscrivent.

Localement, le maintien d'une espèce ne signifie pas sa constance à travers le temps. Il y a même dans une population, polymorphisme génétique car bien naturellement les individus ne sont pas identiques entre eux non seulement par les incidents subis (tels un accident) mais aussi par leurs caractères héréditaires (génomes). On sait aujourd'hui que l'hétérogénéité génétique des populations est énorme grâce à l'étude électrophorétique des enzymes (protéines) les plus communes. Ces protéines constituent une copie transposée des caractères génétiques (ADN) exprimés biochimiquement par ces enzymes (p. 80). Localement une population peut évoluer sur place (évolution sympatrique) et ainsi se maintenir en changeant. Comme chaque point de l'espace-temps offre une holocénose différente, ceci conduit, pour chaque habitat, à une sélection différente des individus de la même espèce. Il y a donc une très forte tendance à une adaptation locale étroite chez les taxons peu mobiles (plantes, lombriciens, colonies microbiennes). Par contre, cette adaptation locale se dilue par le brassage génétique entre individus très mobiles.

Dans l'ensemble de l'aire d'une espèce, il y a donc polytypisme, c'est-à-dire fréquence de nombreux caractères différents entre régions très éloignées, et adaptation de sous-espèces de la même espèce à des holocénoses différentes dans le cadre de l'écocène accueillant cette espèce.

Les milieux étant divers, il y a diversité d'évolution. Des individus, ayant des ancêtres communs, mais devenus par trop différents ne peuvent plus échanger de gènes ou "à la limite" s'ils y parviennent, leur descendance est totalement stérile, car il y a incompatibilité fonctionnelle entre les génomes parentaux. Dans ce cas de discontinuité, on considère qu'il y a deux espèces distinctes (p. 254).

La spéciation, cette rupture d'échange génétique, peut intervenir par de nombreux mécanismes, qui ne seront pas discutés ici, mais dont on peut constater les effets : une énorme diversité au niveau de l'ÉCOSphère faisant l'objet d'une classification et interprétation en progrès permanents, dont nous pouvons constater l'état (p. 250) et décrire sommairement les étapes.

2.6.8. Mise en place des grands phylums : phylogénèse

1. Du protobiotique aux procaryotes

Les conditions prébiotiques (= protobiotiques ou antérieures à la vie) nous sont mal connues. Les reconstitutions de ces conditions protobiotiques ont été abordées au **paragraphe 1.6.2. Il est toutefois possible d'en voir le résultat** : une unité fonctionnelle et structurelle des êtres vivants au niveau moléculaire (p. 80).

Nous connaissons aujourd'hui des formes relativement simples, telles les bactéries chimolithotrophes, proches du protobiotique ; ce monde des procaryotes (monères) a des formes adaptées aux conditions atmosphériques et thermiques les plus diverses. On y rencontre à la fois les organisations structurales les plus simples, la rapidité d'évolution (adaptation) des peuplements la plus grande, la diversité des aptitudes d'oxydoréduction et la fonction chlorophyllienne qui s'est probablement différenciée assez tardivement.

Les procaryotes ou monères (organismes sans organites, donc sans noyaux) occupent fonctionnellement, par leurs aptitudes, à peu près tout ce que la vie sait élémentairement faire (usage de minéraux énergétiques, fixation d'azote N₂, réduction du CO₂, décomposition des molécules organiques par oxydation, etc). En quelque sorte, ils se suffisent à eux-mêmes pour un système vital biosphérique complet... mais peu développé.

Les bactéries ont, en effet, des limitations considérables. Leur organisation reste finalement cellulaire même si des structures coloniales existent. Les mouvements intracellulaires sont inexistantes ou réduits. Leur mobilité active est spatialement limitée par leur taille et leur mode de déplacement est par flagelles ou glissements superficiels chez *Synechococcus*, (WATERBIJRG *et al.*, 1985). Les bactéries nous ont laissé très tôt des fossiles observés dans la microflore de Fig-Tree (Swaziland) par BARGHOORN et SCHOPF (1966).

2. Endosymbiose et eucaryotes

La longue période du précambrien (p. 180) nous révèle peu de fossiles, mais a été le siège d'une évolution par complexité croissante dans laquelle il semble que la symbiose ait joué un rôle essentiel.

Les procaryotes (bactéries, cyanobactéries et actinobactéries) ont différencié des fonctions très diverses dans des lignées distinctes. Leurs propriétés génétiquement codées sur le support d'ADN, libre dans la cellule fonctionnelle des monères peuvent être parfois échangées, entre cellules (échanges d'ADN) mais ces recombinaisons de codes génétiques sont occasionnelles et la reproduction est globalement asexuée. La diversité fonctionnelle du groupe entraîne une organisation spatiale entre monères ayant des fonctions complémentaires. Plus étroits, ces échanges fonctionnels peuvent conduire à des symbioses, ou associations d'organismes, bénéficiant réciproquement les uns des autres de la complémentarité de leurs aptitudes fonctionnelles.

Ces symbioses, parfois associées à un parasitisme de procaryotes par d'autres procaryotes (tel celui des *Bdellovibrio* actuels, bactéries parasitant activement d'autres bactéries), semblent expliquer une association encore plus étroite où des cellules géantes incorporent et spécialisent successivement des bactéries de natures complémentaires.

Ces monères associés n'auraient conservé que les propriétés nécessaires à l'association et auraient perdu leur autonomie en fusionnant en une endosymbiose.

Un organisme complexe en résulte : un eucaryote où les bactéries primitives sont réduites à des fonctions communautaires et ne sont plus que des organites (p. 81) échangeant dans des cellules qui les ont incorporés.

Les études ultrastructurales et biochimiques tendent à accréditer cette hypothèse évolutive. Cette endosymbiose, où il y a incorporation en une cellule des

propriétés de divers organismes, conduit à une cellule complexe à noyau (n'ayant qu'une partie du matériel génétique) et un cytoplasme où des organites, telles les mitochondries, les chloroplastes, les cils ou flagelles des eucaryotes (= undulipodiums), dériveraient d'autant d'organismes qui sont venus s'associer au point de ne plus former qu'un organisme eucaryote à partir d'une succession d'intégrations par endosymbiose de procaryotes (— eucaryotes : organismes à cellule ayant, entre autres, un noyau).

3. Optimisation de l'occupation biologique du milieu

Les procaryotes, formant le règne des monères, occupent donc les milieux fondamentaux et disposent de la plupart des outils biochimiques de la vie. Ils ne quitteront pas ces fonctions mais les eucaryotes, en intégrant ces outils, vont se différencier de plus en plus (fig. 2-24). Ils sont la base des innovations évoquées au paragraphe 2.6.6.

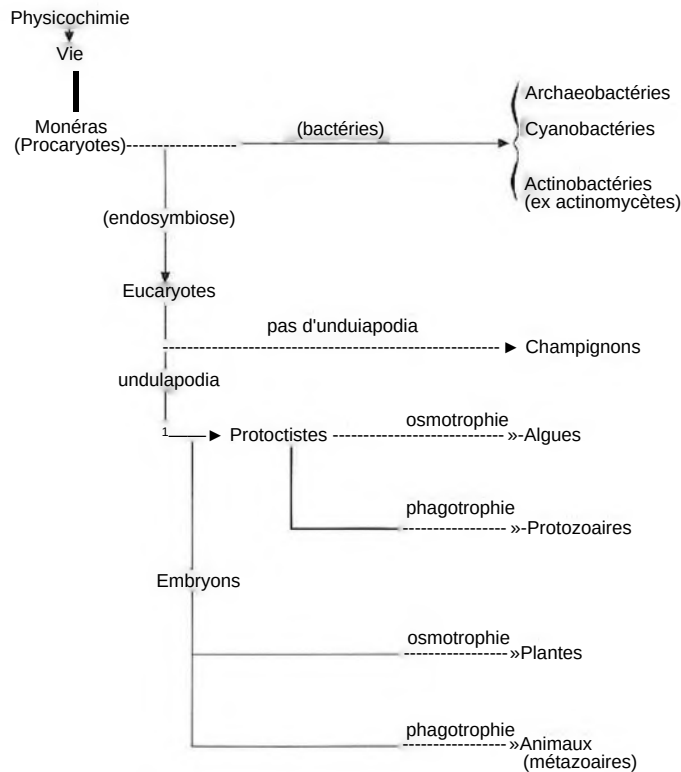


Figure 2-24 - Reconstitution phylogénétique des principaux taxons avec indication des acquis complexifiants essentiels.

On distingue, plus ou moins arbitrairement, parmi les eucaryotes 4 règnes : les protoctistes, les champignons, les animaux et les végétaux.

Les protoctistes sont probablement polyphylétiques (= en fait très subdivisés) et nous ont laissé aujourd'hui les diatomés, myxomycètes, amibes, ciliées, algues (unicellulaires ou pluricellulaires), radiolaires, ... Ces eucaryotes très répandus sont susceptibles de s'organiser à partir de structures unicellulaires en filaments ou

colonies multicellulaires parfois importantes (algues). Ils sont pratiquement tous aquatiques, certains ont la propriété d'ingérer (phagotrophie) tandis que les propriétés d'absorption et photosynthèse, acquises chez les procaryotes, sont conservées. Certains groupes ont une reproduction sexuée (méiose et fécondation), les modalités de reproduction étant très diversifiées.

Les champignons qui ne possèdent pas d'undulapodiums et de phagocytose ; ils ont une organisation généralement filamenteuse constituée de cellules ayant un ou deux noyaux avec reproduction sexuée. Les champignons forment un règne comprenant les levures, moisissures, champignons, etc. Ils acquièrent une vie terrestre souvent en étroite association avec le développement des eucaryotes embryonnés car ils n'assimilent que par absorption (pas de photosynthèse ni phagotrophie) ; leur développement est remarquable notamment en symbiose soit avec les phanérogames (p. 228), soit avec les algues (= lichens).

C'est probablement au sein de l'ensemble complexe des prototistes que se sont différenciés les êtres vivants ayant régulièrement une méiose et se fécondant par conjugaison de cellules haploïdes (contenant un seul stock génétique) et donnant naissance à une organisation tissulaire à partir d'un embryon (eucaryotes embryonnés).

Les eucaryotes à embryons ont une différenciation très nette au cours du développement individuel (= une ontogenèse) conduisant à un stade sexué, unicellulaire et haploïde, un brassage génétique par constitution d'un oeuf à partir de deux cellules (mâle et femelle). Ce stock génétique biparental permet le développement d'un organisme pluricellulaire organisé en tissus complexes et structurés dont une très faible fraction (la lignée germinale) est maintenue grâce à ce complexe (le soma) adapté au milieu. La plupart des cellules, constituant un organisme, perdent alors leurs aptitudes reproductrices en se spécialisant dans des fonctions précises (différenciation des tissus) mais en permettant collectivement le maintien d'une ligne générale retransmise à la génération suivante. Ces eucaryotes embryonnés se sont beaucoup plus récemment (- 1(r)ans ?) différenciés en de multiples lignées végétales et animales selon des mécanismes adaptatifs et d'innovation exposés au paragraphe 2.6.6.

Il est à noter que l'acquisition d'aptitudes nouvelles au cours de la phylogenèse a permis une extension spatiale de la vie - dans les eaux d'abord, les sols humides ensuite et enfin dans la partie émergée de la lithosphère. Les formes actuelles les plus primitives occupent les places fondamentales et les modalités suivantes se sont en quelque sorte superposées et combinées complémentirement avec les précédentes.

Si l'étude des fossiles montre qu'il y a bien eu disparition de lignées entières, on observe une substitution, souvent par d'autres lignées ayant approximativement les mêmes modalités vitales, par exemple entre végétaux chlorophylliens terrestres.

Il est remarquable de constater que les monères sont omniprésents ; les algues dominent les plantes hygrophiles ou amphibies et les plantes vasculaires prédominent en milieux émergés. De même, dans les lignées animales, les annélides, seule classe identifiable (= maintenue) dans les premiers fossiles métazoaires d'Ediacara (datée - 680 millions d'années), occupent toujours de façon dominante leur niche de phagotrophe nécrophage dans les mers puis les eaux douces enfin les sols. Parmi les vertébrés, les poissons poikilothermes dominent les eaux et en derniers chaînons sur les terres émergées les homéothermes n'occupent qu'une place fonctionnelle marginale.

S'il y a dans le détail des adaptations secondaires à des milieux exceptionnels - tels les Zanichedeliacées, monocotylédones marines, mimant les algues - il y a beaucoup plus généralement eu une évolution biologique entraînant, et corrélativement entraînée par, une évolution de l'abios (probablement de l'atmosphère et assurément des sols) qui se fait par addition de nouvelles propriétés dans l'écosphère et permet l'extension du volume occupé par la biosphère.

2.7. Modalités d'études écologiques

2.7.1. Division de l'écosphère

1. Ecosystèmes

Le système écologique est celui existant sur notre globe : l'écosphère. C'est l'objet d'étude des écologues mais aucun écologue ne peut appréhender seul ce système. Toutefois, nous verrons (2ème partie) que, si l'écologie s'organise en science opérationnelle, un tel objectif n'est plus hors de portée grâce au développement des outils d'acquisition (chap. IV), de gestion (chap. V), de traitement de données (chap. VI) et d'intelligence Artificielle écologique (chap. VII).

En pratique, l'écologue travaille sur des systèmes écologiques, c'est-à-dire des systèmes biophysicochimiques, en polarisant souvent son objet d'étude sur les organismes (biologie écologique) et en donnant une primauté tantôt aux études d'état (de la végétation, des dynamiques animales, ...) tantôt aux études fonctionnelles de régulation ou d'échange. Cette spécialisation individuelle obligatoire, jointe au poids des approches biologiques, a rendu et rend encore confuse la terminologie ayant trait aux systèmes écologiques d'une part et aux disciplines les étudiant d'autre part (p. 196).

La définition du mot mésologie a été donnée au paragraphe 1.2.1. ; il s'agit d'un quasi synonyme du mot écologie.

En 1860 BERTILLON, en médecin, distingue l'anatomie, la physiologie et la mésologie. La première correspond à la morphologie (état des systèmes biologiques), la seconde à **<<l'être en lui-même, dans son activité propre, intérieure, | le physiologiste) s'efforce de connaître les propriétés, les usages des éléments anatomiques, des tissus qu'ils constituent et des organes qu'ils forment... >>** (BERTILLON, 1873), la troisième à la mésologie. **<<Au contraire le mésologiste se garde de toucher à l'élément (cellule, organe ou individu) il laisse ce soin au milieu dans lequel il le plonge. >>** (BERTILLON, 1873).

Si la conception de BERTILLON s'applique à l'autécologie (p. 196) elle déborde du cadre écologique (sensu HAECKEL) en ne se référant pas à leur monde extérieur environnant et notamment pas à leurs "conditions d'existence" - bien au contraire, la mésologie pathologique (milieux anormaux) est explicite dès BERTILLON, 1860. Enfin, en 1873, BERTILLON précise que le milieu interne s'appliquant à cette définition, on peut retenir une mésologie histologique, le reste ayant trait aux individus (mésologie végétale, animale, psychique, etc.). Nous retiendrons qu'en écologie, la mésologie ne porte que sur l'action du milieu (extérieur : Aussen-welt, p. 21) sur les organismes et sur les caractéristiques de ces milieux.

Après la définition de l'écologie (HAECKEL, 1866, p. 20) divers concepts globaux, à l'époque non opérationnels, ont peu à peu été proposés.

FRIEDERICH (1927) propose le terme d'holocénose (Holocân) pour l'unité regroupant l'organisation des facteurs du milieu biotique et abiotique interagissant avec un objet d'étude local. Cette approche insistant sur l'organisation des systèmes écologiques et les interactions factorielles, par opposition aux approches monofactorielles, l'holocénose n'étant pas la simple somme de facteurs.

Nous avons vu la définition précise d'écosystème (p. 107). Cette définition, pourtant rédigée par un botaniste, réagit contre le "biocentrisme" qui marque beaucoup d'études "écologiques". Elle est par ailleurs systémique. Tansley précise **<< Actually the System we isolate mentally are not only included as parts of larger ones, but they also overlap, interlock and interact with one another. The isolation is partly lu tificial, but is the only possible way in which we can proceed (The mental**

isolâtes we make are by no means ail coïncident with physical Systems, though many of them are, and the ecosystems among them).> > (TANSLEY, 1935).

Ces limites de l'individu-écologue et cette exigence systémique n'ont souvent pas été perçues et ont conduit à deux déformations intellectuelles

1) certains chercheurs ont voulu donner une définition spatiale à l'écosystème,
2) sous l'influence de HUNTCHINSON (1957) et de ODUM (1953, 1957) ce sont les aspects fonctionnels des écosystèmes, négligeant le structurel, qui ont été mis en avant et popularisés. Ceci devait conduire divers auteurs européens à souligner cet aspect en l'opposant à la morphologie écologique (p. 46) (BALOGH, 1958 ; BRAUN-BLANQUET, 1964 ; Lemée, 1967).

En effet, et indépendamment, les concepts morphologiques distinguant des ensembles d'organismes et des unités abiotiques correspondantes ont été proposés et largement utilisés, surtout en littérature allemande et russe. Par erreur inverse le concept essentiellement morphologique de biogéocénose (SUKATCHEV, 1967) sera assimilé au concept d'écosystème (Odum, 1971, 1ère édition)

Sur cette base, la définition de synécosystème (BRAUN-BLANQUET, 1964) a été proposée pour recouvrir les concepts fonctionnels d'écosystème et morphologiques de biogéocénose... alors que TANSLEY n'a pas opposé ces deux points de vue et a donné explicitement une définition morphofonctionnelle systémique (voir la citation paragraphe 2.1.). Il en ressort que toute une terminologie inutile s'est superposée aux concepts écosystémiques.

Complétant la démarche de FRIEDERICH, Tischler (1949, 1951) propose le concept de Cénose (Zônose) pour définir les organisations biologiques localement présentes dans une unité concrète d'étude à l'intérieur d'un Biome (ensemble des organismes d'une région, p. 195). Cette unité étant soit un ensemble d'organismes locaux (le peuplement d'une forêt de résineux) ou encore une partie de cet ensemble (tels les organismes de la rhizosphère). SCHWENKE (1953) propose le terme de cénotope pour le milieu d'une cénose.

La définition de la biocénose par MOEBIUS (1877) est à la fois un peu moins précise et concrètement remarquable : il s'agit des organismes vivant localement ensemble (Lebensgemeinde, p. 218). Dahi. (1908) devait proposer le mot biotope pour le lieu colonisé par une biocénose (Siedlungsstatte), donc l'abios de ce lieu.

2. Les sous-systèmes écologiques

L'écosystème d'un lieu donné (= holocénose) est rarement étudié de façon globale, très souvent ce sont des systèmes écologiques inférieurs à l'holocénose qui constituent l'objet d'étude. C'est par exemple le cas d'une étude sur le cycle de l'azote dans le sol ou la relation trophique plantes, herbivores, ou encore le cortège parasitaire (et hyperparasitaire) de la pomme. On peut alors distinguer deux modes de division :

1) une coupure technique en subécosystèmes qui subdivise l'holocénose (sol, partie aérienne),
2) une coupure à partir d'un mécanisme écologique précis d'échange, tel le cortège parasitaire de la pomme, les interactions de la rhizosphère ou le mécanisme d'échange d'azote lombriciens-plantes. Il s'agit ici de relations biophysicochimiques portant sur les composants d'un très petit sous-ensemble de l'écosystème qui est étudié de façon aussi complète que possible et dont les divers éléments sont descriptibles. L'objet d'étude est assez restreint pour que l'analyse soit poussée au niveau des relations biotiques et abiotiques ; l'intégration synthétique peut modéliser un syntétron.

Le syntétron est le système écologique organisé comportant au moins une cinèse (transit) et dont les réactions biophysicochimiques sont intégrées au point de

former un ensemble fonctionnel : c'est l'unité écologique d'échange élémentaire morphofonctionnellement intégrant organismes et transits (vie et abios). Il apparaît comme l'unité fonctionnelle immédiatement supérieure à celle de l'organisme, sous réserve qu'il peut ne comporter qu'un organe de cet organisme, comme la racine, mais obligatoirement des relations hors métabolisme.

3. Les divisions opérationnelles

Toute donnée écologique peut être référée clairement à son champ écologique et, en tant que telle, peut être repérée dans l'écosphère. Mais ces observations s'intègrent elles-mêmes à des ensembles de données appartenant à un système écologique. Trois systèmes écologiques sont délimités assez clairement :

- l'écosphère comme ensemble morphofonctionnel le plus vaste incluant la totalité des organismes (p. 195),
- le pieu (p. 131) comme écosystème homogène le plus simple intégrant en fait les transferts verticaux d'une holocénose dont les composantes horizontales sont négligées par intrapolation (le pieu, ayant ici une signification technique, est plus précis que l'holocénose, conceptuelle),
- le syntégon comme ensemble fonctionnel biophysicochimique intégrant des organismes et transits est placé juste "au-dessus" des fonctionnements métaboliques des organismes (écophysologie).

Entre ces trois niveaux, il existe des systèmes écologiques que l'on peut décrire selon de multiples facettes. Ils peuvent être décrits par interpolation entre pieux intégrant notamment des échanges entre holocénoses pour constituer des écoms (Oekom : SCHWERDTFEGGER, 1975) de taille croissante jusqu'à l'écosphère, ou inversement analysés depuis l'écosphère en écoms de plus en plus détaillés au point d'atteindre à l'holocénose, réductible à un pieu.

L'analyse de l'holocénose se fera en portant sur ses sous-systèmes, les subécosystèmes intégrant eux-mêmes des syntégons.

Ainsi, les opérations techniques d'intrapolation des données référencées à leur prélèvement (cf. 2ème partie) peuvent être gérées par reconstitution d'ensembles morphofonctionnels décrits avec souplesse en peu de termes relatifs aux systèmes écologiques (fig. 2-25).

2.7.2. Les hémisystèmes biologiques

Les écosystèmes sont un damier de vie et d'abios (p. 157). Par focalisation sur la seule partie biologique (en ne prenant en compte que les blancs du damier) il est possible de décrire l'hémisystème biologique et d'utiliser les seules références biologiques pour ce damier (dont nous ignorerons conventionnellement, et par carence scientifique, les caractéristiques des "noirs").

Les divisions d'un écosystème local (holocénose) les plus simples, peuvent alors se faire par référence aux unités biologiques. Ceci a été fait de longue date en considérant les individus, les populations et les peuplements. Le milieu physique est alors secondairement référé à ces unités (avec le suffixe *tope*) et les ensembles vivants logiquement par leurs propriétés (avec le suffixe *cénose*).

Ces cénoses se réfèrent aux organismes (ou organes) d'un système écologique (et excluent *ipso facto* les parties abiotiques). Il s'agit des seules parties vivantes, des individus mais non des transits reliant les cinèses des divers écosystèmes et subécosystèmes. Il s'agit de sommes de sous-systèmes disjoints, relevant de hiérarchies cumulables (p. 94).

Complémentairement, le milieu abiotique d'un individu sera son monotope, celui d'une population un dèmotope et celui d'un peuplement (ou d'une synusie ou d'une cénose) un cénotope.

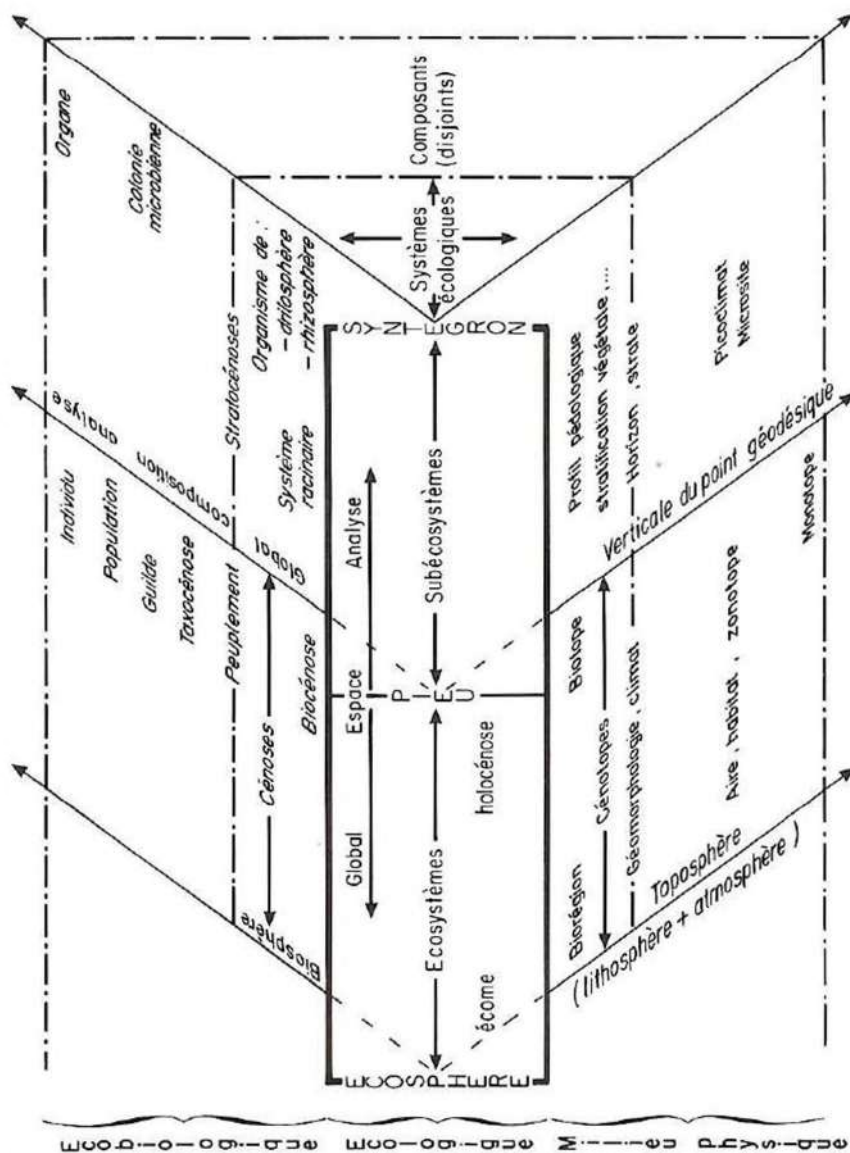


Figure 2-25 - Les systèmes écologiques qualifiés par les approches biologiques, physicochimiques et écologiques. Composants analysés dans les hiérarchies biologiques et physiques.

La notion de population (ou dème) est définie à la fois sur une base taxonomique (= une seule espèce) et sur une base locale : population d'un lieu donné. Les individus d'une même espèce étant en principe interféconds, la population est par conséquence un ensemble local d'individus ayant des échanges génétiques.

Un peuplement est un ensemble de populations locales... le plus complet des peuplements étant la biocénose (p. 192). Toutefois, en pratique, les travaux spécialisés ne se réfèrent qu'à une partie de la biocénose par exemple aux végétaux (phytocénose), aux insectes (entomocénose), etc., c'est-à-dire à un taxon. Les peuplements ayant une référence explicite les limitant à un lieu et une coupure taxonomique sont dénommés Synusies, Taxocénoses ou Guildes. Il s'agit alors d'une fraction de biocénose.

Les organismes vivant dans un écorne forment un biome (CLEMENTS, 1916) et l'ensemble des biocénoses constitue la biosphère. La biosphère est donc l'ensemble des organismes, ou encore l'ensemble de la biomasse, la somme des métabolons.

Le mot biosphère a été défini originellement comme < **Biosphère s.f.** (physiol.) **Atome globuleux qu'on suppose être la base de tous les êtres vivants**>> (CDAF, 1842) puis en français (1900) comme << **Masse globale, ensemble des organismes vivants animaux et végétaux qui vivent à la surface du globe**>> traduit depuis la Biosphère introduit en allemand par SUESS en 1888. Il est à noter que le premier sens (= matière commune de BÜFFON, 1749, p. 252) n'est pas totalement étranger à celui du géologue-naturaliste SUESS, qui distinguait cette masse vivante par rapport au composant abiotique (lithosphère, atmosphère, hydrosphère) de la surface terrestre. Biosphère n'a donc pas le sens d'Ecosphère < **Partie de la sphère terrestre où vivent les organismes vivants, envisagée notamment du point de vue des relations entre ces organismes et leurs milieux**>> ; écosphère a été proposé par le Prof. A. GILLARD (1969) << **I think it would be useful to propose a new term, viz. "ecosphere", for that part of our sphere in which there is life together with the living organisms it contains. In the same way as the "biosphere" is the rough total of all living organisms, the "ecosphere" is the rough total of all ecosystems...**>>.

2.7.3. Les hémisystèmes abiotiques

Les études de bioécologie, focalisées sur les unités écologiquement arbitraires (car systématiquement discontinues) décrites ci-dessus, conduisent symétriquement à définir le milieu abiotique de chacune de ces unités biologiques et l'ensemble de ces deux hémisystèmes des systèmes écologiques.

HEMISYSTEME BIOTIQUE	HEMISYSTEME ABIOTIQUE	SYSTEME ECOLOGIQUES ET COUPLES D'HEMISYSTEMES = C
Biosphère	Toposphère	Ecosphère = S
Biome	Biorégion	Ecorne = S
Cénose	Cénotope	Ecosystème = S
Biocénose	Biotope	Holocénose = S
Population	Démotope	Démocénose = C
Individu	Monotope	Monocénose = C

Tableau 2-6 - Systèmes écologiques majeurs et hémisystèmes biotiques et abiotiques usuellement complémentaires.

Walter et Breckle (1983), dans une approche botanique de l'étude des biomes, à l'échelle de ces hémisystèmes, montrent la nécessité pour qualifier les principaux écorces de se fonder d'abord sur leur zonation macroclimatique en "types climatiques" allant de l'équatorial (= I) au polaire (= IX). Ces auteurs distinguent ensuite à l'intérieur d'un macroclimat les écosystèmes sensibles à l'altitude ou au type de sol (y compris l'hydrographie : cf. le delta égyptien en climat aride) de ceux typiques de la zonation climatique considérée. Etrangement, ces auteurs (en ignorance de CLEMENT, 1916, TANSLEY, 1935, SCHWERDTFEGER, 1975) et par biocentrisme utilisent le radical "biome" pour écosystème alors que leurs critères de décision sont abiotiques. Je reprends leurs conclusions en substituant -tope à -biome. Ces auteurs reconnaissent I à IX zonotopes marqués par des transitions (zonécotopes). A l'intérieur d'un zonotope on est en situation typique (Eutope) ou modifié par l'orographie (altitude) (orotope) ou la pédohydrologie (pédotope).

2.7.4. Disciplines écologiques

L'écologie est une science autonome mais, comme toute science, elle interfère avec de nombreuses disciplines scientifiques et techniques des sciences exactes et de la mathématique (p. 20, 28). Au cours de son développement, et en raison même des limitations techniques de nos devanciers, les recherches écologiques ont été souvent classées selon leur approche méthodologique ou leur objet d'étude. Ces objets d'étude ont été souvent définis à partir de coupures biologiques ou, indépendamment, d'objets physiques.

1. **Disciplines à référence biologique**

A. *Autécologie*

SCHROETER et KIRCHNER (1896) ont proposé sous le nom d'"autokologie" (autécologie ou auto-écologie) une étude de l'écologie focalisée sur les inter-relations d'un individu d'une espèce avec son milieu. Cette discipline s'intéresse à la morphologie, la physiologie, etc., d'individus, en fonction essentiellement de facteurs écologiques. Le mot facteur recouvre ici une variable agissant sur l'individu. Cette approche essentiellement analytique porte usuellement sur les effets :

1) des facteurs abiotiques dominants (température, lumière, humidité,...) reportés dans le contexte physique de leur action sur les êtres vivants, c'est-à-dire l'air (atmosphère), les sols (solides) et les milieux aqueux,

2) des facteurs nutritionnels, c'est-à-dire les modalités nutritionnelles (phytophagie, saprophagie, osmotrophie, ...), les disponibilités trophiques, y compris les moyens d'obtenir ses nutriments, enfin la valeur nutritionnelle des aliments et les effets écologiques des famines,

3) des facteurs biotiques, parmi lesquels les effets sur l'individu des relations intraspécifiques (recherche du partenaire sexuel, modalité de fécondation, effet de groupes, de concurrence, de territoire,...), ou encore des relations interspécifiques (commensalisme, phoresie, parasitisme, prédation, fig. 3-1. p. 226) et les aptitudes individuelles d'adaptation (fertilité, période d'activité, modalités de résistance aux sécheresses et inondations, ...),

4) les facteurs intégrés d'habitat, soit la nature de l'habitat individuel dans sa variabilité dans l'espace et le temps, soit une étude des effets d'interaction des facteurs d'environnement y compris l'ensemble d'entre eux.

L'autécologie est surtout une discipline analytique focalisée sur les potentialités écologiques des individus. Elle n'est écologique (donc réellement autécologique) que dans la mesure où ces études ne s'écartent pas du champ écologique (p. 35), et constitue alors une étude des relations individu-monotope, comme sous-système écologique relativement élémentaire. Son concept rejoint le sens original de mésologie (1860) (p. 22).

B. Dèmécologie

La dèmécologie (SCHWERDFEGGER, 1968, in 2ème éd. 1979) ou écologie des populations prend en compte les relations de la population dans son ensemble, cette branche a eu une importance appliquée très grande dans la mesure où ce type d'observation justifie souvent des décisions techniques ponctuelles, par exemple, choix d'un traitement pesticide ou d'une lutte biologique, quand on connaît la régulation de la dynamique d'une population et son niveau de nuisance économique.

La population (p. 195) est étudiée de divers points de vue :

1) des états : importance (= niveau, densité), distribution (chorologie ou science de la distribution des taxons et biogéographie, science visant à expliquer la distribution de chaque taxon), variabilité morphologique (sexuelle, environnementale, saisonnière...), démographie descriptive (y compris les pyramides d'âges, les sex-ratios) enfin état sanitaire (parasitisme, carence),

2) des aptitudes fonctionnelles, telles les modalités d'interaction entre individus dans la population et les structures "sociales" ou territoriales qui en résultent, telles les aptitudes de la population à réagir aux facteurs analysés individuellement dans le cadre de l'autécologie, telles les potentialités de reproduction et de développement des populations ou les modalités de mortalité,

3) de la dynamique des populations, effectivement observée et expliquée de différents points de vue. C'est-à-dire une dynamique basée sur l'étude déniogéographique locale mais aussi sur les effets de la mobilité (brassage) dans la population ou dans l'espace par migration (colonisations ou translocation par exemple saisonnière). Ceci comporte aussi l'étude des modalités et aptitudes de chaque population (orientation des oiseaux, facteurs régulateurs, ...) ainsi que la chronobiologie des rythmes circadiens, saisonniers et des diverses activités biologiques.

La dynamique des populations a reçu un développement descriptif important basé sur les variabilités d'abondance locale décrites en termes démographiques ou de successions. Il y a recherche d'accords avec des modèles numériques soit par une confrontation avec les facteurs mésologiques soit en classant la typologie des dynamiques (e.g. cycliques, avec gradation, c'est-à-dire croissance envahissante, ...).

Nota : la biogéographie, qui n'a pas de définition formelle et a reçu, de ce fait, des interprétations très diverses (< < **Il y a bien des façons de faire un livre de biogéographie comme en témoigne le contenu fort différent d'ouvrages récents...** >> (Blondel, 1987) constitue une branche de la dèmécologie qui selon Lemee (1967) dépend de la chorologie (répartition géographique des taxons), de la mésologie (science du milieu des taxons) et de l'écologie (entendre ici dèmécologie ou écologie des taxons en tant que populations). Réciproquement l'écologie, au plein sens, intègre l'approche biogéographique (voir ci-dessus).

La dèmécologie, qui est à la fois une discipline biologique et écologique, a reçu un développement important qui diffère cependant considérablement selon les groupes étudiés (mammifères, oiseaux, fougères, ...). La nature des études étant d'ailleurs fort marquée par les aptitudes morphofonctionnelles du phylum auquel elle se cantonne. Comme pour l'autécologie, il y a de très nombreux ouvrages spécialisés relatifs à la dèmécologie des groupes les mieux étudiés.

C. Synécologie

SCHROETER et KIRCHNER définissent ce concept en 1902, à partir d'un point de vue biologique et par contraste à l'autécologie. Il s'agit de la branche de l'écologie considérant l'ensemble des êtres vivants. Cette définition rejoint fortement celle de l'écologie (p. 20) puisqu'elle n'exclut plus la science globale. On peut regarder la synécologie comme la forme achevée de l'écologie par opposition aux approches plus analytiques de la dèmécologie et *a fortiori* de l'autécologie. Toutefois, ici encore un certain biocentrisme focalise très souvent les approches synécologiques sur certains

groupes. En pratique, les études ne portent jamais sur l'ensemble des organismes et leur environnement mais focalisent sur :

1) la structure polyspécifique (distribution des espèces ou stades, formalisation des associations, phytosociologie formelle, distribution des associations végétales, ...),

2) les dynamiques plurispécifiques, comme par exemple les relations temporelles entre les peuplements, les relations hôtes-parasites ou prédateurs-proies, les processus de succession en fonction des modifications d'environnement, notamment l'importance d'interactions avec les activités humaines,

3) les processus proprement fonctionnels incluant les interactions dans les biocénoses (compétition, herbivorie, ...) et les processus liés au rôle métabolique des peuplements en terme chimio-énergétique.

Celle approche de la synécologie, focalisée sur les composants de la biocénose, a pour complément l'approche physique de l'écosphère.

2. Disciplines à référence physicochimique

Certains domaines des sciences physiques concernent l'écologie presque exclusivement. Les données chimiques analytiques portant sur le vivant ou l'abios concernent toutes les échelles de l'écologie et ont reçu un développement spécifique avec la géochimie. La climatologie est une science ayant de fortes implications écologiques, particulièrement la bioclimatologie qui s'intéresse aux interférences climatiques au niveau de la biosphère, donc, de l'écosphère. La pédologie constitue en principe la science du sol quoique sa désignation soit souvent restreinte aux aspects abiotiques du sol, parfois même aux seules études des profils de sol, à leur classement et à leur répartition spatiale.

A une échelle plus générale, la géomorphologie et la géologie jouent un rôle important pour les interprétations au niveau des écorces ou de l'écosphère. Comme la climatologie, la géologie couvre spatialement un domaine plus vaste que le domaine de l'écologie (= l'écosphère). Pédologie, géomorphologie et bioclimatologie apportent des informations sur les biotopes et les biorégions constitutifs de la toposphère (fig. 2-25, p. 194).

3. Disciplines intégrantes

L'écologie ayant un objectif de globalité, ne se prête pas à des découpages tranchés. En fait les systèmes étant fonctionnellement connectés et spatialement/analytiquement placés sur des continuums (p. 38) du champ écologique, aucune coupure nette sur des "unités" écologiques ne s'impose.

On peut toutefois considérer une portion d'espace restreinte comme "homogène" ou, plus correctement, dont l'hétérogénéité est supposée comme négligeable. C'est l'étude stationnelle où le système en cause est une holocénose réduite conceptuellement à un pieu (p. 131). Ces études constituent le grain le plus fin des études écosystémiques. A l'opposé, l'écologie globale tend à intégrer les connaissances relatives à l'écosphère, prise dans son ensemble. C'est l'abord le plus large des études écosystémiques.

Entre ces deux extrêmes, l'écologie des paysages intègre les holocénoses comme unités élémentaires considérées comme homogènes à l'échelle de l'espace (Tesseras). Cette approche distingue des taches (= aires d'apparence différente de son environnement) et des corridors (une bande étroite du territoire différente nettement de ses deux côtés), fondue dans une "matrice". Elle est essentiellement morphologique et spatiale au sens cartographique. Elle traite des écorces, surtout à l'échelle perçue par une photographie aérienne et prend donc en compte les structures morphologiques résultant de transformations d'origine mésologique (mésoneâts) ou anthropiques (actes).

A cet égard, les bordures des taches et corridors communiquent entre eux par des gradients ou des discontinuités plus brutales (écotones). Ces écotones, lieu d'une hétérogénéité importante, constituent des sites morphofonctionnels privilégiés en raison des cinèses qui résultent des différences systémiques spatiales qu'ils caractérisent.

Il s'agit d'une approche écologique très coutumière au sens humain (paysages) où s'applique une diversité terminologique considérable reflétant la diversité des intervenants (paysans, géographes, pédologues, agronomes, écologues divers, ingénieurs-aménageurs du territoire, géomorphologues, ...). Les écologues se spécialisant dans cette approche ont eux-mêmes hérité et développé une conceptualisation détaillée (voir par exemple, TROLL, 1966, FORMAN et GÓDRON, 1986) traitant des cas particuliers de la structure et des changements des écornes.

De nombreux autres concepts de découpe de l'espace tels ceux d'hydrosystèmes, d'associations végétales, de systèmes agraires, d'écocomplexes..... ont été proposés à partir de concepts particuliers, souvent spécialisés et pouvant jouer un rôle utile dans leur contexte. Nous verrons aux paragraphes 4.2. et 4.3. que l'acquisition d'information ne nécessite pas ces découps qui reviennent à choisir dans l'espace des "discontinuités" délimitant des unités "homogènes" alors que l'hétérogénéité est la règle. 11 s'agit en fait de choix circonstanciels, dans des hétérogénéités plus ou moins tranchées, qui sont matière de convenances.

Ces divers concepts peuvent être utiles dans la communication de résultats scientifiques par leur effet "localement" simplificateur en donnant à une microdiscipline ses unités conceptuelles ; ils deviennent malheureusement autant de barrières entre disciplines intégratrices.

Heureusement en écologie opérationnelle ils ne sont pas nécessaires : les classifications spatiales peuvent à tout instant être justifiées et remises en cause à partir d'études typologiques sur DICs (p. 374) en fonction des choix privilégiés à l'intérieur de chaque étude : ces cas rentrent dans l'écosystémique générale et peuvent donc être intégrés dans le Processus Répétitif d'Accroissement des Connaissances par comparaison typologique (p. 337).

Les études particulières, focalisées sur tout ensemble de données sont indispensables et individuellement seules réalisables. 11 est par contre essentiel, pour permettre l'intégration des connaissances, de ne pas lier les données, acquises à ces points de vue particuliers en les rendant indisponibles aux synthèses. Pour cela il faut élaborer, avec des modalités précises et efficaces, l'acquisition, la gestion, l'interprétation et l'intégration des connaissances (voir 2ème partie).

CHAPITRE TROISIEME

LES SOUS-SYSTEMES BIOLOGIQUES (ECOLOGIE BIOLOGIQUE)

3.1. Biologie et écologie

Nous avons vu aux chapitres I et II le caractère indissociable des systèmes écologiques et l'étroite intrication de la vie et de l'abios. Mais nous savons aussi que le développement scientifique depuis le milieu du XIX^{ème} siècle s'est surtout fait, et a socialement "réussi", par une spécialisation de plus en plus poussée, c'est-à-dire une réduction du domaine abordable par chaque scientifique ou maîtrisé par chaque technicien. Pour être opérationnel et efficace, il fallait être spécialisé : l'étude des systèmes écologiques ne s'y prêtait pas.

Nous verrons en deuxième partie qu'il n'en est plus rien et que, bien au contraire, cette parcellisation oblige à une ré-évaluation de chaque acquis spécialisé dans le cadre de synthèses aujourd'hui réalisables et opérationnelles.

La biologie a acquis un statut relativement autonome dès le début du XIX^{ème} siècle. Le mot fut créé vers 1800 (simultanément par TREVIRANUS, BÜRDACH et LAMARCK, comm. pers. G. LAURENT) pour désigner la science étudiant les êtres vivants. A cette époque, si cette science focalise sur les êtres vivants, elle étudie nécessairement ceux-ci dans leur cadre naturel, ou après une transposition en muséum ou en serre d'acclimation. Le biologiste place ses réflexions dans le cadre "naturel". C'est pendant la révolution française que les naturalistes du Muséum de Paris admettent l'évolution (à l'exception notable du jeune CUVIER) puis influencent par leurs travaux la pensée européenne sur la nature (biologique et abiotique : LAMARCK puis Darwin) (Laurent, 1986 et 1987). Cela illustre le faible cloisonnement intellectuel des penseurs de la première moitié du XIX^{ème} siècle et explique la cohérence "écologique" de la pensée lamarckienne.

Ensuite, peu à peu, la biologie s'est spécialisée. Pour certains biologistes, la focalisation se porte presque exclusivement dans l'intimité de l'objet biologique. Alors que l'anatomie comparée d'un Etienne GEOFFROY ST HILAIRE se fait au début du siècle par rapport au mode de vie des animaux disséqués, dès la moitié du XIX^{ème} la physiologie d'un Claude BERNARD insiste sur les mécanismes de régulation du milieu intérieur. La méthode expérimentale isole des mécanismes de plus en plus fins appartenant à une partie de plus en plus particulière des organismes. Cette tendance analytique a récemment abouti aux molécules de l'édifice, base d'un organisme. La biologie s'est en fait diversifiée sur une palette considérable d'approches des échelles moléculaires, tissulaires, hormonales, génétiques, et écologiques. Si certains biologistes par leur mode d'étude ne tiennent plus compte du milieu, ou plus exactement le réduisent à quelques constantes pour simplifier ses effets sur les mécanismes qu'ils étudient, d'autres prennent en compte "les relations des organismes avec leur monde extérieur environnant" en respect d'un aspect de l'écologie (p. 20).

Sans qu'il y ait une franche coupure entre ces divers biologistes et les écologues, il y a un gradient : certains biologistes ignorent pratiquement tout de l'écologie, d'autres se confondent avec les écologues.

La biologie fondamentale, comme la chimie ou la physique, apporte à l'écologie des connaissances essentielles sur les mécanismes potentiels de l'écosphère. En outre, certains biologistes prennent peu ou prou en compte les relations des organismes avec leur monde extérieur environnant et contribuent directement à l'écologie : ce sont les biologistes écologues, ou écobiohistoriens. Evidemment les écobiohistoriens tiennent compte des acquis de la biologie et participent à l'écologie. Ils ne diffèrent des écologues que par l'objet central de leur étude, d'abord vivant, alors que ces derniers s'intéressent aux systèmes écologiques sans privilégier la vie sur l'abios.

Cette prise en compte écobiohistorique diffère beaucoup selon l'approche plus ou moins spécialisée qui focalise sur les individus d'une seule espèce (l'autécologie), sur des populations (démécologie) ou plus rarement sur des peuplements d'organismes dans une approche synécologique (p. 196). C'est souvent par rapport au sujet central vivant que quelques variables d'un environnement seront prises en compte.

Toutefois, la primauté biologique sera consciemment ou involontairement affirmée et ceci conduit fréquemment, du point de vue strictement écologique, à de remarquables distorsions. Très souvent un "écosystème" est alors réduit à ses seules propriétés biologiques ; les facteurs du milieu peuvent être classés et ordonnés à partir de "valeurs" biologiques, telle la loi du facteur limitant édictée par rapport aux besoins dans des circonstances particulières d'une espèce végétale.

Ce biocentrisme des écobiohistoriens est aujourd'hui très gênant en raison même du fait que l'"écologie" est notoirement développée par les biologistes et qu'il est habituel de ne pas percevoir cette distorsion si familière car si commune. Principalement pour cette raison, la théorie écologique est notoirement engluée dans des démarches non réfutables (MURDOCH, 1966) comme en témoigne des travaux où les hémisystèmes vivants discontinus sont confondus avec les écosystèmes réellement et concrètement écologiques (O'NEILL *et al.*, 1986) en illustrant ainsi l'"ambiguïté fondamentale" clairement, dénoncée par TAN SLEY dès 1935.

Cela ne signifie pas que les apports de l'écobiohistorie soient négligeables : ils sont essentiels et constituent actuellement la partie quantitativement dominante de l'écologie. C'est l'absolue nécessité de comprendre au plan fondamental l'existence des êtres vivants ou au plan appliqué, les modalités réelles de liens de leur exploitation-utilisation qui a maintenu l'étude minimale des paramètres abiotiques et l'existence d'une écobiohistorie. Cette importance/distorsion est attestée par la multiplicité des ouvrages dévolus à une écologie végétale, écologie animale, écologie microbienne, ou l'écologie d'un taxon (oiseaux, mammifères, champignons),...

Centrales dans la définition même de l'écologie, les propriétés des organismes ne peuvent être ignorées des écologues. Toutefois, ces propriétés doivent être appréciées *versus* les systèmes écologiques, mais ceux-ci ne sauraient être décrits qu'en termes exclusivement biologiques, ou principalement biologiques, car ceux-ci sont essentiellement biophysicochimiques. S'il est indispensable d'utiliser les apports de l'écobiohistorie, il est nécessaire de replacer ces apports dans une interprétation systémique, écologique et non biocentrique.

Les systèmes biologiques s'inscrivent dans et font partie des systèmes écologiques, ils offrent par ailleurs la particularité d'être constitués d'unités fonctionnelles autonomes, les métabolons (p. 82) se présentant sous formes d'individus, ou de colonies, temporellement transitoires mais se reproduisant.

Ces sous-systèmes écologiques que sont les organismes, sont à un instant-lieu donné cohérents avec le système où ils s'inscrivent et par là même traduisent à la fois leurs propriétés et, pour partie au moins, celles de ce système. Les individus apparaissent alors comme autant de sous-systèmes dispersés dans un écosystème global (l'écosphère) ou des systèmes plus restreints (jusqu'aux syntégrons). Du point de vue écologique, ils sont des composants des systèmes écologiques.

Les divers individus de la biosphère sont des sous-ensembles sans connexions systémiques (p. 93, 103, 398) et ne peuvent de ce fait constituer seuls des systèmes fonctionnels cohérents. Par contre, en raison de leur grande identité, facilement établie, ils constituent un moyen commode de comparaison, de bio-indication, de l'identité relative des systèmes où ils s'inscrivent. Ce point est opérationnellement important en comparaison typologique.

L'adéquation des organismes aux systèmes d'échange dans lesquels ils s'inscrivent, pour écrire en écologie - ou pour s'exprimer en biologiste, l'adaptation des individus à leur milieu - est une propriété fondamentale. Pour les biologistes elle est la condition du maintien ou de la disparition de l'objet biologique étudié et elle est pour l'écologie une caractéristique commode "relativement" homogène et comparable des états des systèmes biophysicochimiques qu'il étudie.

La question centrale relative à la transformation adaptative des organismes (du changement de forme, p. 46) posée à la fin du XVIIIème siècle par LAMARCK n'est pas seulement une tentative d'explication de l'origine et de la diversité de la vie mais répond aussi au problème pratique du maintien des éléments des systèmes qui nous entourent dans un monde changeant (notamment sous l'emprise humaine) et de l'adaptabilité des organismes à nos utilisations (y compris non-utilisations) socio-économiques.

Les approches de l'écobiologie sont extrêmement diversifiées en raison de la spécialisation des biologistes (de la biologie moléculaire à l'étude de biocénoses) et de la grande diversité des formes vivantes (quelques millions d'espèces) et des milieux. Il y a une multitude de travaux focalisés sur une seule espèce, un petit groupe végétal, animal ou microbien, souvent en se restreignant à un milieu (le psammon, une prairie, les écorces d'arbres, ...).

Pour que l'écologie soit opérationnelle, il est indispensable que ces études soient faites par de bons spécialistes maîtrisant bien un domaine précis, mais il est aussi nécessaire d'avoir une vue générale des propriétés des relations de la partie biologique avec les systèmes écologiques. Un rappel succinct et simplificateur de ces traits généraux est donc donné ci-dessous, en insistant, non pas sur ce qui est important aux yeux du spécialiste des divers groupes biologiques, mais sur ce qui est nécessaire pour une pratique d'écologie opérationnelle.

Un rappel schématiquement simple sur l'organisation biologique est d'abord donné (p. 203) avant de constater les aptitudes actuelles de chaque individu (p. 206) et des populations par leur démographie y compris à travers les générations (p. 214). La façon dont des populations différentes cohabitent mutuellement sera ensuite décrite sommairement (p. 218), avant d'aborder le difficile problème des interprétations écologiques des organismes (p. 234) en tentant de dégager leur importance informative dans les systèmes actuels.

Mais la situation actuelle résulte du passé qui pèse par l'information qu'il apporte (innéats) pour l'explication de cette situation présente. Des éléments d'interprétation de cette histoire, contribuant à expliquer le présent, seront donnés (p. 241) avant d'exposer les rudiments du classement des organismes à la fois comme moyen de synthèse et comme outil technique de description des systèmes écologiques (p. 250).

3.2. Vie et milieu

3.2.1. La continuité vitale

Nous avons vu (p. 63) que fondamentalement les organismes sont, et ne sont que, des ensembles physicochimiques faisant partie intégrante d'une succession de chaînes réactionnelles obéissant aux lois thermodynamiques usuelles.

Nous avons vu aussi (p. 82) que dans cet ensemble organisé de réactions physicochimiques des unités particulières s'étaient particularisées en métabolons susceptibles de constituer des unités fonctionnelles ayant une certaine autorégulation à l'intérieur d'une plage réduite et précise d'évènements usuels. Ces unités sont susceptibles d'organiser à partir d'informations, conservées dans leur système, des chaînes réactionnelles favorisant leur propre croissance et pérennité c'est-à-dire leur homéostasie.

La croissance implique qu'un métabolon doit s'allonger ou s'étaler puis se scinder en métabolons pour conserver l'indispensable échange avec l'ensemble du système où il s'inscrit (p. 80). Ainsi, des organismes, morphologiquement distincts dans l'espace, constituent des structures fonctionnelles répétitives, ayant beaucoup de propriétés similaires entre elles. Ces structures échangeant avec le milieu extérieur, en dépendent pour les entrées et le modifient par leurs sorties.

Mais la reproduction en individus distincts issus d'un individu pré-existant a pour conséquences :

- a) que ce processus est temporel,
- b) que le système biologique se développe ou au moins se maintienne.

Cette maintenance, ou ce développement, implique que cette organisation biologique particulière reste auto-organisée et en harmonie d'échanges entrée-sortie physicochimiques avec le milieu.

Pai' contre, ceci n'implique pas, à l'intérieur des conséquences a) et b), que les individus issus au temps $t + 1$ des individus du temps t soient strictement identiques en tout point aux individus du temps t , ni que tous les individus issus en $t + 1$ de t soient strictement identiques entre eux. Il faut et il suffit qu'ils soient harmoniques avec leur milieu (= intégrés au système auquel ils appartiennent).

Mais ce milieu évolue lui-même nécessairement pour des raisons cosmologiques (la terre évolué comme tout astre), pour des raisons locales (tectonique des plaques, orages, ...) dues aux évènements "aléatoires" gouvernant les propriétés physicochimiques externes à la biosphère, enfin du fait même du développement de la vie qui raréfie souvent les assimilais possibles et accumule parfois les émanais.

La non identité des individus $t + 1$ avec les individus t (parents) permet donc une harmonisation aux modifications du milieu en fonction du temps. La diversité des $t + 1$ permet une adaptation à divers aléas aux mêmes lieux, ou à diverses variations du milieu en des lieux différents (p. 184).

L'évolution biologique ainsi décrite est donc un cas particulier de l'évolution générale de l'écosphère (p. 177). On dit que les organismes s'adaptent à leur milieu par sélection naturelle, mais réciproquement, en écologie, on ajoutera que le milieu est modifié par les organismes : il y a évolution globale du système biophysicochimique incluant les organismes.

Alors que la partie abiotique des systèmes se modifie - et éventuellement se bloque par simple arrêt des cinèses dans toute la gamme des réactions physicochimiques - les organismes exigent pour leur maintenance des conditions physicochimiques plus restrictives hors desquelles ils disparaissent en tant que sous-systèmes homéostatiques (fig. 2-22, p. 178) : ces pertes doivent être compensées.

On en déduit :

a) Pour fournir en surpopulation des individus diversifiés à la génération suivante, croître et reproduire est donc un impératif nécessaire au maintien même des systèmes vivants.

b) Les individus à $t + 1$ sont issus de ceux à t et reproduisent au moins largement l'auto-organisation antérieure dont ils sont issus. Si une évolution peut se produire à $t + 2$, $t + 3$, etc., elle procède toujours, comme pour tout système écologique, des états temporellement antérieurs. Si l'on observe dans le temps, il y a filiation des modifications ; la vie ne s'adapte pas par néogenèses spontanées indépendantes mais par évolution biologique à partir de l'état antérieur. Il y a phylogenèse assurant la continuité vitale homéostatique, seule propriété intrinsèque des sous-systèmes biologiques dans les systèmes écologiques.

c) A tout instant, l'organisme en vie est nécessairement en harmonie suffisante avec son milieu qu'il modifie. Organisme et milieu sont deux éléments mutuellement miroirs comparables au sceau et au cachet : la sélection naturelle ne maintient que les individus suffisamment adéquats à leurs milieux ; ces individus reproduiront et refléteront dans leur organisation leurs adaptations à leurs milieux. Il s'agit en fait de deux compartiments d'un même système, ce système vie/abios évoluant (cf. p. 96 pour l'étude systémique et p. 177 pour l'évolution).

De ce point de vue, les êtres vivants lorsqu'ils nous laissent des traces, nous permettent de remonter dans le temps selon un processus phylogénétique d'organisation continue. A la différence de l'abios, il y a nécessairement toujours eu, en raison de la continuité vitale, une permanence temporelle des organismes. La phylogenèse reflète l'évolution des organismes et *ipso facto* celle des systèmes écologiques, physiques, chimiques et biologiques auxquels ils appartiennent. L'écologie bénéficie ici des travaux sur la généalogie biologique.

Remarquons que l'évolution (— changement en fonction du temps, p. 47) n'est pas à démontrer mais résulte de l'existence des changements, cosmologiquement inévitables, des propriétés de l'écosphère et de l'appartenance ancienne, certifiée par les fossiles, des êtres vivants à ce système (p. 177). Ce sont seulement les modalités de cette évolution qui sont à décrire par reconstitutions criticables.

3.2.2. Les contraintes

L'écosphère est un système biophysicochimique soumis à des variations hydriques, thermiques, énergétiques liées aux mouvements astraux et particulièrement à la rotation de la terre sur elle-même et à la périhélie entraînant respectivement les rythmes annuels des saisons (sauf à l'équateur) et les rythmes nycthéméraux (jour-nuit) ou rythme quotidien (p. 119). Les flux photopériodiques (lumière assurant la photosynthèse), thermiques et conséquemment hydriques sont de ce fait variables dans le temps mais très aléatoires localement. A ces aléas climatiques, il faut ajouter des aléas géologiques (tremblements de terre, volcanisme, raz. de marée, transgression marine, orogénèse, dérive des continents, ...) largement interprétés par la tectonique des plaques, mais dont la probabilité est infime à l'échelle d'un organisme. Ces événements aléatoires, souvent mortifères, ne peuvent se compenser que par la surpopulation de ceux qui survivent.

Les organismes devant croître (sinon individuellement, du moins globalement d'une génération à l'autre) pour compenser les aléas et les ressources étant limitées, il en résulte que une des contraintes des êtres vivants sera la compétition entre organismes.

Les organismes (métabolons), qui ne fonctionnent que comme système ouvert, s'inscrivent dans des cinèses dont les débits sont limités par les éléments chimiques présents "utilisables" et par les contraintes thermodynamiques réglant les intensités réactionnelles ; l'espace où la vie peut se développer est alors "limité" : il y a compétition, propriété de tout système écologique.

Entre composants cette compétition n'existe que sous certaines conditions (p. 69). En conséquence, elle sera d'autant plus grande que les organismes ont une grande identité, c'est-à-dire appartiennent à une écophase identique en un lieu strictement, identique au même instant. Inversement les différences entre écophases, espèces, distribution spatio-temporelle, ... reflètent souvent un partage des ressources.

Les contraintes principales seront donc les limitations trophiques d'entrée (assimilation) aggravées par la nécessaire surpopulation, les vitesses réactionnelles liées à la température et les possibilités réactionnelles de transfert en solutions hydriques extra et intra corporelles. Ces contraintes tropho-hydro-thermiques résument l'essentiel des mécanismes fondamentaux limitant la vie mais pouvant prendre des aspects singuliers d'inadéquation organismes/milieux et, parmi ceux-ci, des relations inter-organismes d'antagonismes ou de co-opération.

3.2.3. L'adaptation aux systèmes écologiques

Un système biologique doit donc pour se maintenir avoir une certaine amplitude d'adaptation qui est acquise à un moment donné par trois mécanismes :

1) La résistance individuelle : aptitude intrinsèque de l'individu limitée à absorber des variations d'environnement ; hors les limites c'est la mort.

2) La plasticité génétique : variabilité des individus ayant une diversité d'aptitudes accroissant la probabilité de maintien de la population dans un milieu temporo-spatialement variable.

3) La chorodémographie : ou multiplication-dispersion dans le temps et l'espace des individus d'une même population augmentant par cela leur diversité et la variété des sites où leur vie peut être assurée.

Ces trois mécanismes ne sont pas indépendants. Par exemple, l'accroissement de protection par une coquille (huitre) se paie en temps de croissance (démographie limitée) et une inaptitude au déplacement (répartition bloquée de cette écophase). Une démographie galopante permet d'accroître la plasticité génétique. La possession d'une caractéristique se fait au détriment de son contraire.

L'adaptation apparaît donc comme une variation dans le temps (à travers les générations) des codes génétiques transmettant les régulations métaboliques et caractéristiques morphologiques des systèmes vivants en tant que sous-systèmes inscrits dans leur environnement passé (puisqu'il y a maintien) et probablement futur.

La sélection naturelle, variant avec la diversité des milieux, il y a diversification des êtres vivants, c'est-à-dire adaptation de ceux-ci à chaque milieu. Les milieux changeant, il y a évolution corrélative des êtres vivants à partir de leur état antérieur. Mais en fait la tendance à la diversité spatio-temporelle adaptative des populations (p. 214) est limitée par la compétition entre populations différentes ayant des tendances contradictoires limitant mutuellement la place de chacune (p. 218).

Nous allons d'abord envisager les propriétés d'un individu par sa survie puis les propriétés adaptatives chorodémographiques et de plasticité génétique des populations (p. 214). Ensuite, nous considérerons les interactions entre individus ou populations se partageant leur place dans la biosphère (p. 218).

3.3. Adaptations individuelles comparées

L'étude synchronique de l'adaptation individuelle se fait par comparaison de la diversité des milieux en fonction de la diversité des adaptations biologiques.

- Cette approche analytique focalise usuellement sur un processus adaptatif face à une caractéristique du milieu considérée comme facteur (qui fait cette adaptation) alors que le maintien de la vie implique l'adéquation globale de toutes les propriétés biologiques avec l'ensemble des caractéristiques mésologiques.

- Cela revient à considérer la possibilité d'adaptation des êtres vivants. Cette adaptabilité est limitée aux possibilités générales de réactions biochimiques (limites absolues), mais à l'intérieur de ces limites elle peut avoir des modalités classables *versus* les continuums du milieu (p. 38).

L'adaptation d'un individu à son milieu peut entraîner deux situations extrêmes : une croissance (développement puis possibilité de reproduction) maximale ou, à l'opposé, mort par inadéquation. Mais les situations intermédiaires (de maintien sous contraintes) dépendent d'aptitudes individuelles variées fondées sur la simplicité de l'organisme ou à l'inverse sur une grande complexité. Ces aptitudes traduisent une intégration morphofonctionnelle (p. 184) plus ou moins poussée : la complexité permet une meilleure homéostasie mais oblige à un développement individuel long et sophistiqué (ontogenèse).

Est également variable l'aptitude de s'adapter sur place, c'est-à-dire d'assurer par diverses modalités une cohérence du sous-système biologique avec les seules variations temporelles du milieu.

L'adaptabilité dépend enfin de la recherche dans l'espace des conditions les plus favorables en se déplaçant dans celui-ci ou/et en jouant sur les mouvements du milieu.

Ces diverses propriétés individuelles ne sont pas indépendantes de l'écophysiologie individuelle qui peut avoir des modes de régulations eux-mêmes variant avec l'ontogenèse (p. 211). Le résultat de ces adaptations individuelles se traduit par une plasticité morphofonctionnelle et une adéquation de la croissance individuelle, qui peut être quasi nulle lorsque les individus sont en activité très ralentie (= léthargie) (p. 210).

3.3.1. Intégration morphofonctionnelle (simplicité ou complexité)

Les aptitudes de chaque réaction biochimique sont limitées : un métabolisme intègre nécessairement un minimum de réactions. Un individu minimal comporte au moins l'aptitude d'assimiler les constituants de son organisme et l'énergie nécessaire au bilan exergonique de son métabolisme assurant la maintenance (y compris croissance) du code génétique contrôlant son système.

Un système biologique simple (vivant sur un substrat simple et commun) aura une grande plasticité dans l'espace-temps en retrouvant fréquemment les conditions particulières auxquelles il est adapté et, par simple modification de son code, s'adaptera aux variations locales de ces conditions. Sa taille réduite facilitera l'adaptation démographique du code génétique ; c'est le cas des unicellulaires où l'adulte a la complexité du juvénile, et où les générations peuvent se succéder au rythme des divisions cellulaires.

En acquérant des propriétés supplémentaires, par exemple la mobilité franchissant d'une contrainte locale particulière, l'organisme acquiert une complexité supérieure devant des dépendances immédiates vis-à-vis du milieu, mais entraînant une taille plus grande, donc une moindre démographie (il faut plus de temps pour être adulte) donc une plasticité génétique plus réduite.

La complexité liée aux propriétés additionnelles nouvelles a été acquise au cours de l'évolution (p. 177). Nous nous contenterons de noter que chaque acquisition de propriétés est à la fois le gain d'une certaine autonomie (homéostasie) et

simultanément d'une certaine complexité. Pour une même "place" disponible dans l'écosphère, il peut y avoir deux situations extrêmes 1) de multiples individus très divers, simples, minuscules, individuellement fragiles par intégration fonctionnelle réduite, mais ayant de nombreux mutants, 2) peu d'individus de grande taille, intégrant de multiples fonctions, résistants par homéostasie importante, mais dont la complexité exige individuellement plus de maintenance et dont la mutabilité est limitée par le nombre réduit des descendants par unité de temps et d'espace en raison de la taille individuelle accrue impliquant une reproduction tardive. Si l'évolution générale s'est faite du plus simple au plus compliqué en raison de l'addition de propriétés nouvelles (p. 184), les systèmes "simples", restant optimaux en beaucoup de circonstances, cohabitent avec des organismes complexes et sont parvenus jusqu'à nous à travers les vicissitudes historiques.

Outre la propriété fondamentale d'assimilation-émanation, avec auto-régulation et multiplication, commune à tous les êtres, on note des propriétés particulières importantes propres à certaines lignées vivantes, tels la reproduction sexuée (recombinaison de codes génétiques), la photosynthèse, la circulation interne de fluides (sève, sang, hémolymphe, gaz), la différenciation de tissus, le polymorphisme individuel, le système nerveux, les mémoires, les régulations hormonales, l'homéothermie, l'organisation sociale..... Toute acquisition de ces propriétés implique un accroissement de complexité biologique par innovations évolutives.

La complexité a également un corollaire : si le code génétique peut être retransmis et dispersé sous une forme condensée réduite (une seule cellule suffit), son expression oblige à une organisation pluricellulaire sophistiquée. Cette organisation pluricellulaire implique à son tour un développement individuel permettant d'atteindre un état reproducteur (= adulte) ; il y a développement individuel accompagné de morphogenèse (développement de la forme : organisation cellulaire fonctionnelle en tissus), et régulation de l'individu (= physiologie élaborée). Ce développement individuel, à partir d'une cellule initiale via des formes immatures (embryons, juvéniles) vers des formes adultes (reproductrices) puis sénescences, est l'ontogenèse. Chaque étape de l'ontogenèse a ses propres propriétés et relations avec son milieu : elle est une écophase (p. 211).

.3.3.2. Modalités temporelles d'adaptation aux contraintes

Ce sont des ralentissements importants d'activité liés à une contrainte Lrophohydrothermique, par exemple la sécheresse en climat tropical ou le froid en climat tempéré, qui entraînent l'un et l'autre la réduction des surfaces d'échange des végétaux (feuilles, souvent racines), un enroulement des lombriciens dans le sol, une hibernation (ou estivation) de nombreux animaux, enfin la dormance de graines, d'insectes, ...

1. Régulation directe d'activité

La régulation directe par les facteurs de l'environnement agissant "immédiatement" sur la physiologie, les mouvements et la croissance de l'être vivant, s'illustre abondamment. Notamment par la stimulation de croissance (simple réponse positive) ou l'inverse, le ralentissement jusqu'à l'arrêt (quiescence) pouvant aller jusqu'à l'anabiose : suspension temporelle des fonctions vitales avec maintien des structures (chez, certains tardigrades, graines, bactéries).

A) L'activité

1) Comme tout système écologique, les organismes ont un fonctionnement dépendant de la température, c'est-à-dire de l'agitation thermique permettant les cinèses liées aux réactions (bio)chimiques. Cette agitation devient insuffisante avec la congélation du système hydrique des organismes (vers - 1 à - 5°C) ou trop élevée

pour maintenir les organisations vivantes (p. 72) entre 40°C et 80°C à pression normale.

Entre ces températures l'essentiel des organismes en nombre et en biomasse "dépend" de la température dans la mesure où leurs cinèses internes et d'échange milieu-organisme sont usuellement doublées pour une élévation de température de 10°C ($Q_{10} = 2$, p. 113). Ce sont les poïkilothermes (ou poïcilothers) qui constituent l'essentiel de la biosphère, c'est-à-dire la totalité des plantes, des microorganismes (monères, protocistes) et la plupart des animaux. Il y a exception pour certains vertébrés homéothermes (et rarement intermédiaires : hétérothermes) qui, au prix d'un coût énergétique très élevé, contrôlent leur température par réactions biochimiques exergoniques.

Ce groupe d'animaux homéothermes a en effet développé une adaptation particulière utilisant la thermogenèse des réactions exothermiques de leur système biochimique pour réguler celui-ci au-dessus de l'ambiance thermique moyenne de leur milieu (usuellement 37°C pour les mammifères, 40°C pour les oiseaux). Cette adaptation régulatrice est obtenue à la fois en accroissant cette thermogenèse et en ralentissant la diffusion (= émission de rayons infrarouges) de ces organismes grâce à des structures isolantes (adiposité, plumage, pelage, ...), telles celles de la baleine, des oiseaux, ... En cas d'un milieu à température excessive, différents dispositifs de protection (les mêmes que précédemment) joints à des voies de réfrigérations (= évaporations) sudoripares ou pulmonaires (= halètement des chiens par exemple) refroidissent ces organismes. Ces homéothermes, qui ne représentent usuellement que quelques kg ms/ha, ont l'avantage de s'affranchir largement des aléas thermiques mais au prix d'une grande complexité et d'un déphasage avec les rythmes saisonniers de l'essentiel des réactions biophysicochimiques de leur milieu. Ce déphasage peut être mis à profit (proies usuellement mobiles "figées" par le froid).

Les poïkilothermes ont par contre pour l'essentiel un échange passif avec le milieu, leur température suivant largement celui-ci et leur activité étant quasi synchrone avec les disponibilités trophiques créées généralement par d'autres poïkilothermes et les réactions chimiques thermodépendantes de l'abios.

Poïkilothermes et homéothermes développent par ailleurs divers moyens de régulation thermique telle l'évapotranspiration des plantes, telles les structures protectrices ou régulatrices, telle l'utilisation des hétérogénéités spatiales pour les organismes qui vivent dans des gradients thermiques en s'exposant aux températures optimales (— thermopreferendum). C'est le cas des plantes fixées, qui évapotranspirent de jour en utilisant le gradient moteur d'évaporation (des racines en source froide et feuilles en source chaude) et des animaux qui lézardent (= se placent dans l'optimum thermique) comme les papillons, les vers de terre anéciques, ... et évidemment le lézard.

Ainsi l'exposition des feuilles au rayonnement solaire est doublement utilisée, à la fois pour la photosynthèse (p. 133) et par une évaporation favorisant l'ascension vasculaire de la sève brute aqueuse depuis les racines et le sol.

Ainsi les anéciques, vivant dans le gradient thermique du sol (froid en surface et chaud en profondeur à l'automne et à l'inverse chaud en surface et froid en profondeur au printemps) utilisent, hors prises d'aliments, ce gradient pour optimiser leurs digestion et métabolisme (HEIDET *et al.*, sous presse) ; la dépendance/thermomigration de ces animaux a pu être modélisée :

Pour *Nicodrillus longus* (Ude) à Cîteaux (Côte d'Or) l'indice de mobilité (Mib), mesurant le niveau d'activité, est : $Mib = f(0).g(pF).h(DJ)$ avec :

$$f(0) = 1,53/1 + 0,685 e^{0,1U81} \quad (T = \text{température du sol à } -20 \text{ cm})$$

$$g(pF) = 1,06 \text{ si } pF \text{ à } -10 \text{ cm} < 3,1$$

$$g(pF) = 1,06 e^{1,236(pF-3,1)} \text{ si } pF > 3,1$$

$$h(DJ) = 1 \text{ pour une durée du jour } DJ < 15,3 \text{ heures}$$

$$h(DJ) = 0 \text{ si } DJ > 15,3$$

Une formulation plus précise et sophistiquée est établie à partir de la température la plus proche de l'optimum ($= 12^{\circ} \text{C}$) présente dans le profil de sol, pour tenir compte du thermopréférendum effectif des individus dans le gradient permis par les galeries verticales où se déplacent les animaux.

Nous trouvons également chez ces animaux, comme chez beaucoup d'autres, un aménagement du milieu (galeries subverticales) limitant les contraintes thermiques. Nous connaissons des phénomènes comparables chez des poïkilothermes susceptibles d'ailleurs d'une thermogenèse temporaire dont l'activité réactionnelle biochimique doit être suffisante pour certaines activités, notamment le vol d'insectes précédé d'un "échauffement" musculaire.

2) L'eau constitue le principal vecteur des systèmes écologiques (p. 121). Ses propriétés polaires permettent l'organisation du vivant et de l'abios à faible énergie (forces de Van der Waals, p. 58). Les êtres vivants en dépendent considérablement. La régulation hydrique s'effectue pour une large part par échange passif avec le milieu, ou faiblement actif notamment par osmose permettant une certaine orientation des flux aqueux.

À l'instar des poïkilothermes pour la température, les "poïkilohydriques" ont une hydratation corporelle essentiellement dépendante du milieu ; des forces de succion équilibrent l'organisme avec celui-ci. L'eau est pratiquement libre et abondamment disponible pour les organismes jusque vers $pF = 3,4$ (0,25 MPa) les pressions osmotiques usuelles des contenus des organismes assurent leur hydratation. Pour des forces de succion du milieu plus fortes, les animaux, microorganismes ou plantes pompent l'eau nécessaire, cette dépense énergétique trouve sa limite assez rapidement (vers $pF = 3,8 = 0,62 \text{ MPa}$). Au-dessus de ce seuil les organismes tendent à se mettre en système "clos" évitant les pertes corporelles (fermeture des stomates des plantes, physiologie de diapause des lombriciens, etc.).

La grande difficulté de l'appréciation des relations hydriques tient à l'absence usuelle de références correctes (avec mesures précises) des forces hydrostatiques régissant les relations milieu-organismes.

On note toutefois le développement dans divers groupes d'une relative homéohydrie. C'est particulièrement le cas des plantes succulentes qui possèdent diverses protections contre la déshydratation et qui exploitent au mieux les variations nyctémérales des tensions hydriques (jeux des condensations/évaporations liés au rythme journalier des températures en climat thermique contrasté car sec) notamment par une photosynthèse particulière (CAM, p. 136). De même, les animaux des milieux arides réduisent leurs pertes d'eau et utilisent parfois exclusivement, l'eau "métabolique" provenant du catabolisme ("photosynthèse inverse") des aliments conduisant à $(\text{CH}_2\text{O})_n + n\text{O}_2 \sim n\text{CO}_2 + n\text{H}_2\text{O} + \text{U}$.

Ici encore il existe des aménagements du milieu, par les organismes tendant à réduire leur dépendance hydrique, telles les galeries de *Lumbricus* permettant l'accès aux horizons toujours humides dans certains sols (BOUCHE et BEUGNOT, 1978) ou celles d'écrevisses terricoles descendant jusqu'à la nappe phréatique.

3) Les disponibilités trophiques jouent aussi un rôle de régulation directe sur les organismes : richesse minérale et lumineuse pour les chlorophylliens, richesse d'aliment organique assimilable pour les hétérotrophes, richesse de substrat minéral énergétique pour les chimolithotrophes. Dans ces cas de figures, les organismes peuvent également améliorer leur homéostasie par divers procédés de réserves énergétiques internes telles les panicules adipeux, et parfois externes, mie) des abeilles, matière organique mélangée au minéral par les lombriciens anéciques : cycle coprodigestif (p. 150). Une certaine sophistication peut entraîner des réponses avec délais (réponse d'une graine, réponse complexe d'un système nerveux). Il y a en effet des intermédiaires entre l'action directe par diffusion passive de l'eau, de la température et des nutriments et des réponses différées parfois très élaborées, permettant une adaptation aux contraintes.

Bj La quiescence (corrélation mésologique)

On nomme quiescence une léthargie ou quasi-arrêt d'activité biologique, résultant de l'action non différée de facteur(s) du milieu contrôlant cette inactivation.

C'est une léthargie corrélée à une condition tnésologique limitante. La limitation environnementale est le facteur déclenchant le ralentissement d'activité. La "levée du facteur" (= suppression de la cause) entraîne la suppression de l'effet. Il n'y a en fait aucune coupure nette entre un ralentissement d'activité étroitement corrélé au facteur (tel l'effet de l'abaissement de température chez les poïkilothermes) et un ralentissement autocontrôlé. Des effets de seuils commandent en fait l'arrêt d'une activité normale (échange photosynthétique ralenti par fermeture des pores des feuilles (stomates), arrêt d'activité motrice (= enroulement) des lombriciens par anhydrobiose, etc.

2. Régulation à effet différé

Les êtres vivants étant soumis à des aléas mésologiques ont développé des régulations écophysiologiques extrêmement diverses qui ne peuvent être détaillées ici. Comme pour les régulations directes, les régulations différées dépendent des mésonéats, mais ici des mécanismes physiologiques créent un "délai de réponse" entre le facteur déclenchant et son effet. Ces mécanismes, développés surtout chez les êtres complexes, créent un ajustement temporel de l'écophysiologie des organismes.

A) Diapause à induction chronobiologique

L'organisation physiologique préparant une léthargie spécifique, la diapause, permet à l'organisme de "se préparer", c'est-à-dire d'adopter une modalité physiologique, voire un comportement, face aux conditions trophohydrothermiques futures liées aux saisons.

La photopériode joue alors un rôle essentiel : c'est le calendrier solaire de la chronobiologie. Elle permet aux organismes de régler leur activité sexuelle (accouplement, floraison, ...) de sorte que les résultats (jeunes, graines) coïncident avec la saison optimale (nourriture abondante pour les jeunes, floraison laissant le temps de fructifier).

Ces régulations portent sur les processus écophysiologiques les plus divers allant de la métamorphose des insectes hétérométaboles, aux périodes de reproduction, aux migrations d'éléments nutritifs dans la plante, aux abscissions foliaires des caducifoliées, aux migrations saisonnières des oiseaux,... et aux léthargies sous contrôle physiologique hormonal (hypophyse, *corpora alata*, ...). Ces régulations contrôlent des activités de croissance et de développement, mais aussi des léthargies avec ralentissement puis arrêt d'activités diverses (sexuelles, nutritionnelles), voire l'acquisition de propriétés spéciales. Les organismes à diapause régulent leur activité par une physiologie souvent complexe (par exemple, durée du jour — cerveau — neurosécrétions — régulations endocrines des organes) . Ici la "cause" régulatrice déclenche, avec un délai, une léthargie qui après un autre délai (= durée de la mauvaise période) est elle-même levée. Certaines diapauses, une fois induites, demandent une "levée de dormance" (cf. ci-dessous), telle la vernalisation de plantes entières.

B) Dormance (arrêt ontogénétique)

Les dormances désignent une adaptation assez particulière où l'arrêt d'activité est initial, l'écophase (une graine, le dernier stade larvaire chez le Coléoptère *Balaninus elephas* Gyll, Coutin, 1961, ...) est d'emblée en léthargie, induite sans cause externe immédiate (quiescence) ou délai (diapause) mais ontogénétiquement. C'est une écophase qui d'emblée est dormante. La régulation est cependant variée selon la levée de dormance. Certaines écophases initialement actives entrent en diapause selon un rythme photopériodique puis nécessitent alors une levée de dormance.

1) Levée de dormances saisonnières

C'est la régulation d'organismes nécessitant un facteur saisonnier caractéristique permettant l'ajustement du cycle biologique aux saisons. Par exemple,

la vernalisation des végétaux (graines, plantes entières) est caractérisée par le signal "froid hivernal" qui lève la dormance pour un développement printanier.

2) Levée de dormances aléatoires

Ici la levée de dormance semble liée à la ibis à des mécanismes internes de lente maturation physiologique et à des causes écologiques aléatoires inductrices.

Dans ce dernier cas, il semble que les dormances ne soient pas qu'une simple adaptation climatique, mais une forme de résistance "statistique" aux aléas, rares mais drastiques, tels les feux, les tornades, les inondations, la famine ou au contraire l'attente de conditions rares (graines en sous-bois "attendant" un feu ou un chablis forestiers, pour une plante héliophile pionnière des clairières). Un stock de graines parfois ancien assure la continuité vitale. Ces plantes "vagabondes" se sont trouvées pré-adaptées aux conditions socio-économiques lorsque les actes humains ont surimposé leurs aléas spécifiques aux "accidents" naturels (lorsque parmi les exnéats les actes, dont le défrichement, ont crû par rapport aux mésonéats, p. 96), de sorte que les adventices ont souvent des graines à dormance. La levée de dormance peut être induite par des signaux biochimiques relatifs aux potentialités nutritionnelles (hôte induisant la germination de spores parasites, ...).

3.3.3. Modalités spatiales d'adaptation aux contraintes

Les changements de conditions de milieu résultent de cinèses ; une façon de s'adapter à ces changements est d'exploiter les éléments favorables mobiles se présentant au niveau d'un organisme, ou de s'effacer par "fuite", ou recherche d'un optimum, dans un milieu hétérogène.

La possibilité pour un organe ou un organisme de se mouvoir permet de substituer à la léthargie le mouvement, soit pour rechercher un lieu protecteur ou un lieu plus favorable. La mobilité de l'organisme oblige de toute façon à un accroissement de la complexité par acquisition de propriétés morphologiques ou/et physiologiques liées à celle-ci.

Le mouvement est ici considéré comme un déplacement par rapport au milieu ; il prendra quatre modalités souvent complémentaires ou interdépendantes :

1) le déplacement ou mouvement d'organisme actif : l'être vivant a une aptitude locomotrice : marche, saut, nage, vol battant, drageonnage, enfouissement dans le sol ou projection de graines, entraînant une dépense d'énergie ;

2) la phorésie ou mouvement d'organisme passif. L'être vivant se sert d'un mobile dans un environnement globalement fixe : courants hydriques, vents, animaux. De tels organismes développent des morphologies d'"accrochage" ou de sustentation pour utiliser ces divers moyens, voire dans les cas sophistiqués (co-évolution, p. 229) des physiologies attractives (fleurs, fruits) vis-à-vis des animaux utilisés. C'est le cas des mouvements des organismes, spores ou diaspores : vols passifs, hydrochories, entomochories, ornithochories, anémochories de graines, pollen, plantes, phorésie d'acariens sur des coléoptères, des nématodes dans les lombriciens, ...

3) la fixation dans un milieu mobile : permet un renouvellement surtout nutritif :

- mouvements hydriques : animaux fixes des zones intertidales ou des cours d'eau
- mouvements hydriques et gazeux : autour des plantes et animaux,
- mouvements d'organismes piégés (plantes carnivores, toiles d'araignée, etc.)

4) la mobilisation du milieu

4a) fluide, ce sont les mouvements de fluides pompés et filtrés avant une éventuelle assimilation ou/et après une éventuelle émanation (courant hydrique vers les racines, dans les galeries de polychètes marins, dans les coquilles de bivalves, dans les poumons, les ruches, ...),

4b) solide (associé aux fluides). Ce sont les déplacements, soit pour créer des conditions d'ambiance plus favorables (niches, creusement de galeries, maisons, transport d'engrais, ...), soit plus directement trophiques (transit intestinal du milieu),

4c) des organismes attirés (voir 2, ci-dessus : physiologies attractives).

3.3.4. Continuité vitale et ontogenèse

Les organismes constituent des entités homéostatiques permanentes et continues dans le temps (p. 177, fig. 2-22). A un instant donné tous ces sous-systèmes procèdent d'un état vivant antérieur quelle que soit leur écophase (arbre, spermatozoïde, bulbe, larve, bactérie, algue, spore, mollusque, oeuf, ...). Un être vivant résulte d'un état vivant permanent, la multiplication compensant les mortalités sans descendance (p. 203). Si certains organismes ont simplement une croissance suivie de scissions en deux individus (bactéries, ...), des mécanismes infiniment plus complexes se sont mis en place dans cette continuité vitale. L'organisme passe par des écophases de croissance, de reproduction (sexuelle), de gamètes, d'oeufs à recombinaisons génétiques (échange de gènes entre organismes) modifiant la diversité des génomes des populations (p. 214). On parle alors de développement individuel en considérant de façon conventionnelle qu'un individu "débute" au stade monocellulaire simple, après une éventuelle recombinaison sexuelle (= l'oeuf), le conduisant par une croissance individuelle au stade d'adulte reproducteur. Ce développement individuel vers la forme la plus complexe est l'ontogenèse. L'adulte produit les gamètes (ovules, spermatozoïdes, pollen) susceptibles de poursuivre cette vie alors que sa majeure partie est physiquement destinée à la sénescence suivie de mort.

De très nombreux ouvrages de biologie et d'écobiologie décrivent la grande diversité des modalités d'adaptation des différentes écophases des organismes car d'un point de vue biologique ces différentes modalités expriment des potentialités et des limites à la croissance et à la reproduction individuelle. Ceci ayant des conséquences démographiques : les populations compensent plus ou moins rapidement les pertes.

Au point de vue de l'organisation écosystémique, il est essentiel de noter que la diversité des formes d'un même organisme en fonction de l'espace-temps reflète la diversité des milieux où cet individu s'inscrit. Chaque écophase est un système écophysio-logique. Cette ontogénèse peut être caractérisée par des écophases très distinctes (on parle alors de stades) ou au contraire continues. L'ovule, la graine, le spermatozoïde, la plantule germinante, l'oeuf, l'embryon sont des stades peu complexes suivis, chez les organismes complexes, de la phase de croissance juvénile puis de l'individu adulte reproducteur (mâle, femelle, hermaphrodite, ...) ou à la reproduction asexuée (schizoidie, marcottage, division de bactéries, ...). Ces changements d'états coïncident avec des changements mésologiques.

Le polymorphisme ontogénétique déjà évident entre écophases (tels ovule, plantule, arbre) est tout à fait spectaculaire chez les animaux à exosquelette (arthropodes) ayant des mues, voire des métamorphoses (insectes hétérométaboles), tels la chenille (juvénile) herbivore et le papillon nectarivore ou la larve de moustique aquatique et l'adulte aérien ectoparasite hématophage.

Ces polymorphismes ontogénétiques peuvent se compléter d'un certain dimorphisme sexuel (entre mâle et femelle) et même d'un polymorphisme cyclique, les générations se succédant n'ayant ni les mêmes caractéristiques, ni les mêmes modes de reproduction (cas des pucerons ayant plusieurs générations par an).

C'est l'adéquation de chaque écophase à son milieu qui permet l'écophase suivante, donc la continuité vitale. 11 s'en suit que la sélection naturelle opère sur chaque écophase (séparée ou non en stades tranchés) et donc sur l'organisation ontogénétique (génome contrôlant la cohérence du développement ontogénétique).

De ce point de vue, la notion de "cycle de développement individuel", impliquant un retour à une situation qui a quasi-préexisté, néglige le référentiel temps. Cette "simplification" (que l'on retrouve dans celle de cycle des éléments, p. 164) peut faire oublier, comme nous allons le voir, que la continuité vitale est ontogénétique et adaptative.

Les biologistes au XIXème siècle ont étudié avec attention cette ontogenèse qui, chez les embryons d'organismes complexes, fait apparaître souvent transitoirement des caractéristiques morphologiques considérées comme ancestrales. Citons à titre d'exemple la découverte, observable dans la "mâchoire" temporaire des embryons de mammifères, de l'origine mandibulaire des os de l'oreille interne. Cette interprétation embryologique indique une origine reptilienne synapside, longtemps niée par carence de fossiles, et est aujourd'hui attestée (p. 185). C'est le principe lapidaire énoncé par E. HAECKEL en 1866a : << l'ontogenèse est une courte récapitulation de la phylogenèse >> ("loi biogénétique fondamentale", de CUENOT, 1932).

Pris de façon étroite, ce principe se heurte très vite à de multiples impasses dont la plus spectaculaire est celle observable chez les organismes à métamorphoses ; pris strictement le papillon a pour ancêtre une forme "chenille". Le nombre d'observations en contradiction avec le principe énoncé ci-dessus peut être accumulé indéfiniment... tout en constatant de multiples cas où le principe semble s'appliquer.

C'est GRANJEAN (1947a et b) qui, en s'appuyant sur une observation méthodique et méticuleuse des diverses stases (stades de développement) des Acariens oribates (arthropodes arachnéides), a été conduit à une proposition contradictoire -en fait, complémentaire- avec la "loi biogénétique". Cette proposition se résume de la façon suivante : chaque stade évolue pour son propre compte. La sélection qui s'effectue au stade graine ou larvaire ne se fait pas "pour" le stade floral ou adulte.

En d'autres termes, les différents stades de développement ontogénétiques peuvent avoir acquis des caractéristiques adaptatives qui ne se retrouvent pas dans les précédents et les suivants : ainsi le développement des insectes hétérométaboles (à métamorphoses) a notamment une primauté nutritionnelle larvaire tandis que le stade adulte a une primauté reproductrice (organes sexuels, organes de locomotion et dispersion par le vol). Ces ontogenèses à métamorphoses sont dites dysharmoniques par opposition aux développements harmoniques où l'enchaînement des écophases se fait graduellement.

3.3.5. Expressions mésologiques : polymorphisme mésologique

L'organisme formé par un seul code génétique (haploïde) ou par deux codes jumelés (diploïde), voire de multiples répliquations génétiques (polyploïde) fonctionne entre deux "sources d'information" contrôlant son fonctionnement, d'une part les innéats du code génétique transmis par la continuité vitale, d'autre part, les exnéats agissant sur lui. Le sous-système vivant maintient l'homéostasie de son fonctionnement grâce à ses innéats (code génétique et expression physiologique de celui-ci) sous les contraintes du milieu (p. 203).

Les organismes, qui peuvent avoir un même génome (tels les jumeaux vrais ou les boutures végétales), reçoivent des exnéats conduisant temporellement à des résultats fort différents. Les basses températures ralentissent le développement ; l'absence de lumière étiole les plantes ; l'abondance alimentaire stimule la croissance et les mises en réserve ; un traumatisme ampute d'un organe, etc. Avec un même génotype il peut y avoir plusieurs phénotypes.

Il y a en fait toujours différents phénotypes, les conditions mésologiques n'étant pas uniformes. Cette nécessaire souplesse adaptative inclut les mécanismes de rétroaction milieu-génome permis par le métabolisme et les amplitudes de réponse des organismes. Elle est rendue possible du fait que le génome ne contrôle pas tout, telle la température corporelle des poïkilothermes.

Le polymorphisme mésologique (dépendant du milieu) prend des allures spectaculaires, tel l'exemple classique des trois types de feuilles de la sagittaire (feuilles rubanées immergées, feuilles lenticulaires flottantes, feuilles lancéolées émergées). Il peut prendre des formes plus subtiles comme les différences de composition entre feuilles de lumière et feuilles d'ombre ou le développement des pigments mélaniques de la peau humaine sous les influences des UV solaires.

3.4. Adaptations des populations

3.4.1. Mutabilité et brassage génétique : polymorphisme et spéciation

Nous avons déjà évoqué à plusieurs reprises (p. 80, 178, 203) le fait que l'organisation vitale d'un individu est maintenue quasi-constante au cours de sa vie et à travers les générations grâce à un code génétique ayant pour support physique l'ADN... ; mais que ce code, à la suite notamment d'accidents physiques (rayons ionisants) ou chimiques (substances mutagènes), subit des altérations de sorte que cette "constance" est relative et permet une évolution à travers les générations qui en se succédant ne se ressemblent pas exactement (p. 183).

Remarquons aussi que ce code d'ADN est en général cellulaire mais que certaines informations chez les eucaryotes sont cytoplasmiques. Ainsi l'information des graines (cytoplasmique et nucléaire) diffère de celle des zygotes (pollen : essentiellement nucléaire).

Considérons ici les conséquences synchroniques, quasi-instantanées de cette situation au plan adaptatif, c'est-à-dire celles que l'on peut écologiquement observer dans l'actuel.

Les mutations aléatoires se réalisent, quant à leurs conséquences, sur des individus portant ces modifications. La probabilité qu'une mutation apparaisse est donc proportionnelle au nombre d'individus, c'est-à-dire à l'effectif présent par unité de volume de l'écosphère. Elle est aussi dépendante du nombre de générations par unité de temps, chaque génération produisant en définitive un nombre d'individus par espace/temps qui est un nombre d'expressions génotypiques.

Nous avons vu (p. 177) qu'aux aléas externes répondent les aléas internes (mutations) dont la fréquence dépend donc du nombre d'individus par espace-temps.

Il peut y avoir adaptation, pour une population, du taux de reproduction et du nombre d'individus, à la fois pour être en surpopulation (indispensable, cf. p. 177) et pour limiter les conséquences d'une compétition stérile. En conséquence, plus les aléas externes seront grands (à tous les stades de la vie), plus il y aura prolificité. Plus ils seront réduits, plus la reproduction pourra être limitée (p. 248) : il y a ajustement de la prolificité aux aléas mortifères.

Le nombre des individus à un même instant dépend de la taille des organismes : plus celui-ci est gros plus les besoins Lropho-énergétiques décroissent par unité pondérale (cette relation n'est pas en général linéaire, cf. loi de ZEUTHEN, 1947). En outre, un même individu peut être plus complexe donc plus homéostatique, donc moins soumis aux exnéats. De plus, il y a des systèmes conservateurs pour minimiser les conséquences des mutations (notion d'allèles récessifs).

Des dispositifs très divers favorisent les reproducteurs jeunes, donc l'adaptabilité. Citons par exemple l'hypertélie des cervidés accélérant le renouvellement des mâles (BOTNAR1UC, 1963) ou la mort des insectes peu après l'acte de reproduction.

La mutation est elle-même un phénomène aléatoire apparaissant dans un code génétique complexe (= génome), souvent très long. Cette anomalie n'est pas nécessairement favorable à l'organisme qui est alors directement éliminé par la sélection naturelle dans le cas des formes simples à un seul génome par individu (procaryotes). Chez les diploïdes ou polyploïdes à reproduction sexuée, les anomalies (dites récessives) ne s'expriment qu'après copies dans plusieurs générations, ce qui conduit à une dispersion de celles-ci dans plusieurs individus, en des génomes recombinaison grâce aux échanges de matériel génétique (p. 190). Ces recombinaisons interviennent avant duplication cellulaire des individus. Elles jouent le double rôle 1°) de protection des organismes complexes contre les aléas de mutation, 2°) de recombinaisons variées quant aux conséquences sélectives de la modification

biomoléculaire induisant des transformations fonctionnelles cellulaires multiples et interactives avec les autres gènes, enfin 3^e) elles faciliteraient les innovations évolutives (p. 184).

Même chez les formes à génome simple, des échanges de matériel génétique peuvent conduire à des recombinaisons du génome de façon plus ou moins aléatoire. La reproduction sexuée est une organisation de la conservation des mutations ; la recombinaison des mutations permet un polymorphisme génétique.

Il y a non seulement variabilité par mutation mais aussi par recombinaison. Celle-ci porte sur le génome qui, au niveau d'une population, a une forte diversité par polymorphisme des locus. Les locus sont les lieux du code génétique qui peuvent porter le plus généralement plusieurs codes (allèles) dans une population : deux dans un individu dit hétérozygote ou un seul, répété deux fois, chez un homozygote).

Cette diversité du polymorphisme semble être la règle (LEWONTIN, 1974) et permet lors de la séparation des populations une différenciation de celles-ci (par sélection-adaptation à des milieux différents ou aussi, peut-être, par simple hasard ou dérive génétique).

Le brassage génétique par échange et recombinaison de génomes peut être très localisé ou au contraire très dispersé dans l'espace. Ceci est lié à l'aptitude individuelle de mobilité des différentes écophases (p. 206), tels les pollens anémochores ou entomochores, ou encore les larves zoés des bivalves, les pluies de graines dispersées par les oiseaux ou les mammifères frugivores, ...

Si la mobilité est réduite, le brassage génétique a localement un fort pouvoir adaptatif en fonction du temps (à travers les générations), il y a une grande différenciation particulariste. A l'inverse, le brassage à grande distance "uniformise" les populations par rapport à une situation locale. L'ajustement très précis à un lieu donné est généralement lié à une vie très sédentaire de toutes les écophases. Le brassage à grande distance interdit des adaptations locales optimales.

Depuis LEVENE (1953) certains biologistes parlent de métapopulations dans lesquelles ils distinguent spatialement des populations, puis analysent les échanges entre ces populations constitutives. De toute façon, le milieu d'une population inclut, par définition, les populations voisines.

Les populations d'une même espèce échangent, entre elles et à l'intérieur d'elles-mêmes, des génomes qui fondamentalement sont compatibles. Par définition, une espèce regroupe la somme des populations échangeant leurs génomes. Ceci implique qu'il y ait reproduction sexuée, ce qui n'est, pas toujours le cas ; le concept d'espèce devient alors arbitraire comme pour les autres taxons (cf. hiérarchie taxonomique, p. 258).

Les populations peuvent, pour diverses raisons historiques, devenir localement si distinctes que leur système génétique, leur comportement d'appariement sexuel interdisent dans la nature les échanges génétiques... Il y a alors deux espèces au sens biologique (et correct) du terme. Le polymorphisme entre populations peut être regardé de ce point de vue comme une étape potentielle vers la spéciation (= formation d'espèces) si les populations se séparent au point de devenir entre elles stériles (p. 187).

Dans la pratique, les biologistes (et plus précisément les taxonomistes) ne disposent généralement pas d'une information suffisante pour fonder sur une base certaine les espèces : des règles et pratiques provisoires permettent toutefois un classement des êtres vivants (p. 254).

3.4.2. Plasticité génétique et polymorphisme

Les biologistes étudiant les mécanismes reliant gènes (diversité des allèles) et caractéristiques exprimées par une éventuelle mutation, et la signification d'une mutation en termes d'adaptation au milieu, sont confrontés à un redoutable problème lié au changement de système d'étude (au sens de la systémique, p. 93, 234).

Nous avons aujourd'hui la possibilité dans un certain nombre de cas d'observer la transcription presque directe des diverses formes des allèles (code d'ADN) produisant des protéines (allozymes) qui, lorsque leur charges, tailles et formes sont différentes, peuvent être séparées par électrophorèse. Mais il y a un pas considérable entre ce constat et la compréhension des conséquences morphofonctionnelles de ces modifications ; conséquences qui dépendent des variations simultanées des autres allèles modifiant la protéine, et de l'impact de cette modification parmi les autres mutations recombinaisons. C'est l'ensemble des régulations d'un génome qui caractérise un individu, c'est l'ensemble des allèles de chaque individu qui va lui donner, sous effet du milieu, ces caractéristiques morphofonctionnelles.

Le génotype n'est jamais complètement décrit mais le polymorphisme génétique relatif des populations peut être apprécié.

Quant aux caractéristiques morphofonctionnelles reliant un individu à ses aptitudes d'adaptation plus ou moins bonnes à son milieu, elles sont elles-mêmes décrites par un nombre réduit de caractéristiques morphologiques ou/et physiologiques.

Pour l'écobiologiste reste enfin à comprendre la valeur adaptative de l'ensemble de ces caractéristiques morphofonctionnelles dans l'ensemble des contraintes temporospatiales subies par les diverses écophases de l'organisme en tenant compte de la diversité des situations individuelles dans la population.

Ici encore comme pour le génotype et le phénotype, le milieu n'est jamais décrit de façon complète ou même approchée. On comprend dès lors la très grande difficulté de relier les approches du généticien à celles du biologiste et celles de ce dernier à celles de l'écobiologiste (p. 235). Les interprétations en ces domaines sont difficilement testables et offrent un beau panorama de controverses qui deviennent probablement insolubles lorsque, ignorant la nécessité opérationnelle des connexités systémiques (p. 93), on s'efforce de spéculer directement sur la valeur adaptative d'une mutation.

Heureusement, d'un point de vue pratique, l'écologue n'a souvent besoin que de constater la variabilité réalisée des populations et leur diversité dans l'espace. De même le sélectionneur agit directement sur un choix de caractéristiques phénotypiques en poursuivant, avec la manière plus méthodique des généticiens, la sélection pratiquée par les jardiniers et les éleveurs depuis très longtemps. Cette sélection a constitué les premiers éléments de preuve "expérimentale" des mécanismes du transformisme biologique (DARWIN, 1859).

D'un point de vue opérationnel, il est possible au niveau d'une population de noter de nombreuses caractéristiques 1) à l'échelle génétique, notamment la diversité des systèmes enzymatiques, chromosomiques (nombre de chromosomes, degré de ploidie), modalités de reproduction sexuée, asexuée, agamique, ..., 2) à l'échelle individuelle : caractéristiques morphologiques, physiologiques, démographiques, comportementales, ... susceptibles d'interprétation vis-à-vis de la mésologie des populations, 3) à l'échelle mésologique : les caractéristiques du milieu.

Si dans certains cas, il est possible de démontrer les liens entre les systèmes fonctionnels en cause, dans la plupart des cas, en raison de la complexité de connexités systémiques, les interprétations ne sont que des commentaires plausibles (p. 234, 237) (SCHWERTFEGGER, 1979 ; FORD, 1972 ; PERNES, 1984).

La possibilité croissante de gérer simultanément des informations mésologiques et écobiologiques devrait réduire peu à peu l'importance des commentaires plausibles au profit de propositions testables quant aux relations actuelles entre caractéristiques biotiques et mésologiques. L'origine historique de ces relations restera toutefois

difficilement démontrable (p. 180) et fait appel à de multiples mécanismes déjà exposés (p. 183, ...).

3.4.3. Sexualité et agamie

Le brassage génétique entre parents marque la reproduction biparentale et peut être considéré comme un puissant moyen de recombinaison des caractéristiques génétiques qui soumettent ainsi cette diversité combinatoire aux aléas sélectifs du milieu.

Toutefois de nombreux phylums (les 2/3 chez les animaux métazoaires) possèdent conjointement des lignées ayant une reproduction agamique (reproduction uniparentale) conduisant aux clones... qui prospèrent fort bien et démontrent que la sexualité biparentale exclusive n'est pas forcément le seul système possible pour le maintien de la vie.

Un clone est un ensemble d'individus génétiquement identiques par ascendance parentale unique. Celui-ci peut résulter de deux processus :

1) division somatique et génétique d'un parent en 2 à n individus : il y a continuité somatico-génétique,

2) reproduction sexuée uniparentale : c'est l'apomixie (= parthénogenèse). La lignée germinale d'un parent sert de point de départ à la croissance de l'individu adulte à partir d'un ovule régulé à $2n$ soit par régulation préméiotique ($2n \rightarrow 4n \rightarrow$ méiose (réduction) = $2n$) soit par régulation postméiotique ($2n \rightarrow$ méiose $\rightarrow$ $4n \rightarrow$ $\times 2 = 2n$).

Ces divers mécanismes excluent les recombinaisons entre individus mais nullement les variations entre génération surtout s'il y a polyploïdie (xn) (n — le génome répété x fois dans l'individu parental ; les " n " peuvent diverger entre eux).

De nombreuses spéculations, rarement réfutables au plan scientifique, sont associées à l'interprétation de ce mode de reproduction clonal (somatique ou sexué) et à de très nombreuses variantes. On admet usuellement pour la parthénogenèse (= apomixie) qu'elle dérive d'une simplification de la reproduction sexuée. Entre ces deux modalités, il y a des situations intermédiaires d'apomixie/biparentalité relative qui permettraient bien des adaptations (voir pour ces processus HUGHES, 1987 ; PERNES, 1984).

3.5. Agencements biocénotiques

3.5.1. Mécanismes

La biocénotique (ou biocénologie) est la science étudiant les biocénoses. Une biocénose est un < < groupement d'êtres vivants correspondant, par leur composition, par le nombre d'espèces et des individus, à des conditions moyennes de milieu, groupement d'organismes qui sont liés par une dépendance réciproque et qui se maintiennent en se reproduisant dans un certain endroit d'une façon permanente> > (Möbius, 1877, trad. TOUFFET, 1982). En bref, c'est la somme des organismes d'un lieu. L'usage a consacré un mode spatialement extensif au mot biocénose, qui se réfère donc à la partie vivante (somme des organismes) des écosystèmes (p. 191) de sorte que la biocénotique focalise sur les organismes des écosystèmes (fig. 2-25, p. 194) et inclut la comparaison temporelle (successions) ou spatiale (répartitions) des cénoesip. 193).

Cette discipline, typiquement écobioologique, est développée (car elle rentre dans le cadre académique de la biologie) et fait l'objet de nombreuses recherches regroupées souvent en références à des disciplines plus précises (géonémie, biogéographie, bio-énergétique, ...). Elle a en propre de s'intéresser d'abord à l'organisation de ces biocénoses, c'est-à-dire aux relations entre organismes (interactions biotiques) et à la façon dont les organismes s'alimentent les uns des autres (chaînes alimentaires), voire au rôle des organismes sur leur milieu (et réciproquement).

La plupart des ouvrages d'écologie moderne développe beaucoup ces aspects qui ne seront par contre qu'esquissés ici ■ en raison de ces développements, qu'il est inutile de reprendre, et en raison du caractère opérationnellement biaisé de l'approche biocénotique vis-à-vis des écosystèmes. Cette discipline est en effet d'autant plus efficace que les organismes sont sous la dépendance des relations biotiques (telles les relations plantes/herbivores, prédateurs/proies) et peu pertinente lorsque le poids des paramètres abiotiques devient dominant. Excluant conceptuellement (et en pratique marginalisant seulement) l'abios, elle ne permet pas une systémique objective.

Les individus d'une même population, normalement en surpopulation (p. 177), se partagent les possibilités vitales de l'espace. Cette place écologique peut elle-même être disputée par des organismes d'espèces différentes. En fait, plus les individus sont semblables (= génétiquement donc morphologiquement et physiologiquement similaires) plus leurs besoins et leurs aptitudes sont semblables, plus on peut supputer que la compétition pour exactement, les mêmes ressources croît.

Comme pour tout système écologique, la compétition en parallèle (p. 70) sera donc maximale entre individus identiques, de la même espèce et écophase au même temps-espace, puis ira décroissante pour des affinités fonctionnelles dimimuanes. Nous avons vu que la compétition peut aussi s'exercer en série dans un système écologique, c'est-à-dire qu'une espèce utilise une ressource avant une autre qui temporospatialement ne dispose que des "restes". Bien des situations intermédiaires existent entre ces deux formes de compétitions et font l'objet de nombreuses descriptions.

Il est à noter que ces deux formes de compétitions dépendent des aptitudes des organismes mais aussi de leur place, en tant que sous-systèmes dans le système écologique qui les inclut. Cette place écologique du sous-système biologique dans son système a reçu des définitions les rendant opérationnelles ou au contraire conjecturelles.

L'aire d'un taxon est l'espace, usuellement une surface, en dehors de laquelle ce taxon n'est pas rencontré ; la réciproque n'est pas vraie, la présence du taxon n'est pas obligatoire dans son aire.

L'habitat est l'espace, usuellement une surface, où le taxon (individu, espèce, ...) est présent sinon en permanence (en cas de mobilité, p. 211) au moins de façon prévisible. C'est la surface effectivement fréquentée par le taxon considéré.

La localisation est la situation exacte où un individu d'un taxon est observé.

Le mot niche initialement utilisé en littérature anglo-saxonne est infiniment plus confus. C'est GRINNEL (1917) qui introduit ce mot en écologie, dans un travail analysant l'importance de certains facteurs écologiques supposés limitant l'habitat d'un oiseau ; il ne définit pas explicitement le terme mais le spécifiera en 1928 vis-à-vis du référendaire spatial : << ultimate distributional unit >>.

Indépendamment, ELTON (1927) définit le terme niche << **It is therefore convenient to have some term to describe the status of an animal in its community, to indicate what it is doing and not merely what it looks like, and the term used is "niche". Animal have all manner of external factors acting upon them - chemical, physical, and biotic - and the "niche" of an animal means its place in the biotic environment, its relations to f<x>d and enemies.** >> Cette définition écrite dans une conception restrictive d'écobiologie animale implique une définition du rôle trophique d'un organisme comme acteur (doing) et comme source de nourriture : c'est sa position dans des chaînes trophiques réduites aux seuls organismes. Les exemples décrits par l'auteur ne laissent aucun doute sur ce point, en terme moderne, c'est simplement la position trophique d'un organisme. L'intérêt de ELTON était de comparer les organismes vicariants jouant des fonctions écosystémiques assez semblables (= équivalence écologique, RAMADE, 1984).

En ignorant apparemment ELTON, HUTCHINSON (1957) définit la niche fondamentale pour désigner l'hypervolume de l'ensemble des facteurs du milieu comme une abstraction formelle << **of what is usually meant by an ecological niche** >> (sic 1).

Cette définition formellement intéressante revient à appeler "niche fondamentale" le milieu du taxon considéré dans un espace multidimensionnel, ce qui n'est pas original (p. 341). OLJUM (1959) distingue bien la niche s'appliquant à la "profession" par opposition à l'habitat (adresse)... mais avec une "profession" réduite aux seules interactions biotiques.

Associé au concept de niche se trouve dès l'origine lié le principe d'exclusion. << **It is, of course, axiomatic that no two species regularly established in a single fauna have precisely the same niche relationships** >> (GRINNEL, 1917). Ce principe sera à nouveau formellement énoncé par GAUSE (1934) et constitue l'un des arguments théoriques autour du concept de niche.

Avec l'adoption du concept de niche multidimensionnelle il devient possible de situer les individus des espèces relativement aux divers paramètres de l'hyperespace "niche". MAC ARTHUR (1968), édictant une théorie de la niche, remarque à cet égard que le terme niche ne peut être rejeté comme non opérationnel en raison du fait qu'il implique un nombre infini de mesures car quelques informations relatives aux différences entre niches sont parfaitement vérifiables << which is all that **matters** >>.

C'est omettre en ce domaine une difficulté opérationnelle qui avait d'ailleurs été soulignée comme un paradoxe par HUTCHINSON (1961) : chaque fois que le "principe d'exclusion" n'est pas vérifié (= la théorie est réfutée), il suffit d'approfondir l'étude des relations milieu-taxon (apports de nouvelles informations) pour que le principe soit vérifié. En d'autres termes, chaque fois que deux populations locales de deux espèces occupent une même niche perçue... il faut poursuivre l'étude pour constater que les niches sont différentes - et la théorie est vérifiée !

Il est à remarquer ici que le principe d'exclusion, tout comme la compétition, n'a pas à être démontré (p. 70) car il découle des propriétés de la matière ; celui-ci n'est pas, comme le qualifie GRINNEL "axiomatique", ni un "principe" ou un "paradoxe", mais simplement un corollaire de la définition théorique et pratique de l'espèce (p. 264). Soit les taxons considérés sont distincts et forment localement deux

populations identifiables et de ce fait chaque individu d'une population est génétiquement, donc physiologiquement et écologiquement, distinct d'un autre individu de l'autre population (corollaire : leurs niches hutchinsoniennes sont distinctes) ; soit on ne peut distinguer les individus qui appartiennent alors à la même population.

On comprend dès lors, qu'à condition de choisir une approche analytique restreinte à quelques arguments, un foisonnement d'études puisse conduire à des interprétations nombreuses, convergentes ou contradictoires, quoique s'inscrivant, dès que l'on dépasse les limites bornant ces études, dans le cadre simple des propriétés de la matière. Dans ces conditions, divers concepts de niches (et terminologies associées) apparaissent souvent comme peu opérationnels.

A noter que ces concepts, pour spéculativement et intellectuellement utiles qu'ils fussent à cette époque, n'ont de valeur opérationnelle qu'à partir d'approches spécialisées non généralisables. Il en est toujours de même dans la pratique aujourd'hui où l'écobiologiste, s'appuyant sur son expérience d'expert (p. 342), réduit l'étude des "niches" à quelques caractéristiques particulières qu'il sélectionne, ce qui introduit dans ses interprétations des hypothèses importantes.

Cette situation pourrait changer par la prise en compte exhaustive des caractéristiques des milieux et un classement morphofonctionnel des taxons, ce qui est présenté opérationnellement dans le présent ouvrage respectivement aux paragraphes 3.6.3. et 6.4.4., il est vrai dans deux études disjointes qui n'ont pas permis de confronter milieux et taxons, mais en montrant la faisabilité de la comparaison des caractéristiques du milieu à celle des taxons (p. 357, 367).

Le fait de pouvoir passer à ces études multivariées - non réduites à quelques propriétés des milieux, ou/et quelques critères individuels ou populationnels - rend possible l'étude objective des relations entre le milieu, des localisations et caractéristiques intrinsèques des écophases dans ces milieux, c'est-à-dire la possibilité de l'abord concret de la place écologique.

Pour ce faire, il y a lieu d'abandonner tout un langage flou issu des travaux antérieurs nécessairement limités. A cet égard, l'ouvrage de WITTAKER et LEVIN, 1975, montre à la fois l'imbroglio des "significations", souvent très imprécisément définies par une terminologie elle-même imprécise, du mot niche et ses connotations avec l'usage inutilement spéculatif des concepts de compétition, d'exclusion, ... et la confusion fréquente entre trophique et biolytique.

Encore cet ouvrage ne se réfère qu'à quelques travaux classiques anglo-saxons. Le terme niche, à vouloir tout dire, ne dit plus rien opérationnellement, les efforts de clarification des auteurs divergeant (par exemple comparer WITTAKER *et al.*, 1973 ; BLONDEL *et al.*, 1979 ; Stungren, 1986, ...).

Nombre d'auteurs tendent, en première approximation, à utiliser le mot "niche" pour son sens français (la niche du chien !) c'est-à-dire l'habitat... Ce qui conduit à reconnaître une niche spatiale et une niche trophique (RAMADE, 1984) (niša de habitat et niša trófica, STUNGREN, 1965, räumliche Nische, trophiche Nische, STUNGREN, 1978, 1986).

Je m'efforce de résumer tableau 3-1 les significations les plus courantes avec une signification formelle pour les mots, conceptuellement assurés, retenus dans cet ouvrage.

Il semble plus efficace de retenir une terminologie opérationnelle aire, habitat et localisation (cette dernière pour la place temporo-spatiale précise), milieu pour l'entour effectif des organismes, interactions biotiques pour les seules actions entre organismes du milieu (le "doing" de ELTON), chaînon trophique (sens de la niche eltonienne comme la place "in the biotic environment") dans la mesure où l'on

CONCEPTS TEMPOROSPATIAUX AUTÉCOLOGIQUES

Aire (cf. 3.5.1.)

Habitat (cf. 3.5.1.) ou encore plus précis localisation (cf. 3.5.1.)

= niche de Grinnell, 1917, précisée 1928 ; niche de habitat (STUNGREN, 1965)
 raumliche Nische (STUNGREN, 1978), niche spatiale (RAMAUE, 1984)
 habitat (WITTACKER et al., 1973)

Saisonnalité

= présence saisonnière de l'écophase dans une localisation, un habitat ou une aire temporaires

CONCEPTS RELATIONNELS BIOECENOTIQUES

Chaînon

niche de Elton (1927)

Biohytisme (Bouche, 1971)

niça trophica (STUNGREN, 1965)

(herbivorie, carnivorie, parasitisme, etc) niche trophique (Ramade, 1984)

trophische Nische (Stungren, 1978)

niche (WITTAKER et al., 1973)

CONCEPTS ECOSYSTEMIQUES

Place (écosystémique)

= niche de Hutchinson, 1957 sans exclusive spatiale ni fonctionnelle

= toutes les inter-relations population/milieu

ou peuplement/milieu ou biocénose/biotope (cf. 2.7.3.)

Tableau 3-1 - Concepts relatifs aux relations milieu-taxon (écophase). En souligné la terminologie opérationnelle retenue.

considère des successions trophiques d'organismes (négligeant les transits entre métabolons, malgré leur importance). Le monotope et le dèmonotope sont respectivement la place des individus et des populations (p. 195) dans le champ écologique (considéré selon ses trois référentiels ; espace, temps, composition) où ils accomplissent leurs rôles (dont les actions biotiques).

L'étude des distributions spatiales des taxons (aire et habitat) s'appelle chorologie, celle de leur milieu, mésologie, de leurs interactions biotiques, biocénotique. La biogéographie tente d'expliquer les distributions des organismes dans l'espace et la paléontologie celles dans le temps. Ces diverses disciplines contribuent ainsi à une connaissance des systèmes écologiques. Elles sont développées dans de nombreux ouvrages consacrés à des cas spécifiques illustrant le rôle de quelques variables du milieu sur les organismes ou des interactions biotiques entre espèces compétitrices pour des disponibilités trophiques (taille du chaînon : niche trophique) ou la défense spatiale de l'habitat (niche spatiale).

Des êtres vivants ayant suivi des itinéraires évolutifs fort différents peuvent - dans des lieux différents - converger vers des places semblables.

C'est pourquoi il n'est pas inutile de chercher, à partir d'une approche actuelle (non phylogénétique), de classer les fonctions et/ou les localisations car le milieu de toute population est à la fois physicochimique et biologique (autres populations) de

sorte que Les co-adaptations des cohabitants sont obligatoires, de même que les co-modifications physicochimiques du milieu.

Mais le partage des places écologiques ne se fait pas entre organismes de façon quelconque et les écobiologistes ont décrit depuis longtemps les interactions biotiques (p. 225), pas toutes de nature trophique, et les chaînes trophiques (p. 229) régissant les organisations biocénétiques. La place occupée par les organismes peut être encore envisagée sous l'angle de leur rôle sur leur milieu : conduisant à un classement des rôles qu'ils remplissent. Les relations trophiques entraînent des interactions qui peuvent être considérées comme des rôles. Interactions biotiques, habitats, chaînes trophiques et rôles constituent quatre aspects interdépendants décrivant la place des organismes considérés et conduisent à l'interprétation écobiologique des organismes (p. 234).

3.5.2, Rôles : les actions sur le milieu

Les organismes agissent sur le milieu par différentes modalités qui peuvent être classées en actions chimiques (c'est-à-dire échange de substances) et en actions physiques (c'est-à-dire développement d'un travail). En biocénétique, on s'intéresse en outre aux conséquences biologiques de ces actions sur les autres organismes. De ce point de vue, hors le neutralisme (p. 225), ces actions conduisent à des morts partielles (de substances ou d'organes) ou totales (d'organismes), c'est-à-dire à des biolyses, ou au contraire à des transformations de milieu, favorisant la croissance, le développement, c'est-à-dire la biostimulation des organismes.

1. Rôles chimiques

Les êtres vivants agissent (bio)chimiquement sur le milieu ne serait-ce que par la conséquence de leur assimilation et émanation ; ceci est vrai pour tout métabolon (p. 82).

Ils agissent sur le milieu par émanation lélémetabolique de substances facilitant (hors du métabolon) l'assimilation. C'est le cas des excréments d'exo-enzymes libérées dans le milieu, telles des protéases. Chez les osmotrophes (Lwoff, 1943), la portée des actions télémetaboliques est réduite, mécaniquement et biochimiquement, l'assimilation étant facilitée par simple libération d'exo-enzymes dans le milieu. L'acquisition du mouvement va permettre d'isoler par la phagotrophie les substrats du milieu lysables, trophiquement riches, dans l'organisme morphologique mais hors organisme physiologique (= métabolon), pour mieux cibler l'excrétion d'enzymes sur ces substrats.

Les exhalaisons gazeuses peuvent avoir des fonctions métaboliques (échange O_2 , CO_2) mais aussi être des signaux pour un organisme coopérant (et aboutissant éventuellement à un antagoniste), tels les phénomènes d'attraction sexuelle, les parfums des fruits attirant les chiroptères frugivores (...). Les émanations chimiques peuvent également maintenir à l'écart, inhiber ou détruire certains organismes (allélopathie, antibiose, ...) (p. 225).

2. Rôles physiques

A) Déplacements

Une partie de l'énergie dépensée par un organisme est motrice et dégradée soit dans l'organisme (Q), soit dans son milieu (W) à la suite d'un travail de déplacement. Les déplacements d'éléments dans l'écosystème peuvent avoir de grandes conséquences, évidentes quand on connaît cette nécessité vitale essentielle (p. 107). Parmi ceux-ci, notons l'existence des déplacements biologiques d'éléments chimiques vasculaires, mycéliens, endentériens qui souvent compensent et complètent les transferts uniquement physiques en organisant structurellement l'espace (p. 124).

B) Phagotrophie

L'ingestion dans un tube digestif (ou une vacuole) s'accompagne d'un travail physique de préhension buccale, mastication et trituration digestive... souvent accompagnée d'un déplacement et toujours d'une restructuration des éléments digérés, mais non assimilés, puis rejetés par défécation (= fèces).

C) Structuration

Cette action physique, souvent complexe, résulte de la mise en place des organismes eux-mêmes dans le milieu et de modifications du milieu qu'ils façonnent. Cela va de l'excrétion-tissage de toiles d'araignées, au brassage continu de sol (matière organique, minérale et microorganismes) des vers de terre (de l'ordre de 300 T/ha/an), au mouvement d'eau chargé d'éléments nutritifs absorbés par les plantes (= 4 000 à 20 000 T/ha/an), au débit gazeux via les stomates des végétaux (2 à $3 \cdot 10^8$ m³ d'air/ha/an) à la construction des fourmilières, au travail des racines ou enfin à la croissance végétale (accumulation dans les branches et troncs). Cette structuration a notamment pour effet d'accroître l'épaisseur de la biosphère (vers le haut par les arbres, vers le bas dans le sol par le travail animal et racinaire) et de modifier sensiblement les débits de fluides (solutions aqueuses, gaz) et les flux thermiques et photoniques dans ces structures.

Les structures formées par les êtres vivants eux-mêmes ou par un complexe vie-abios constituent des organisations d'échanges d'un rôle considérable surtout dans la porosphère (sol et sédiments) et la partie atmosphérique de la biosphère. Du point de vue des organismes, ils peuvent être considérés comme adaptés à un milieu qu'ils ont eux-mêmes profondément modifié.

D) Radiations

Les actions biophysiques sur le milieu ont aussi trait aux bilans radiatifs d'absorption-réémission entraînant des conséquences biocénétiques très diverses telle l'organisation stratifiée des organismes héliophiles, sciaphiles et lucifuges, tel le repérage de l'hôte par le moustique sensible aux infra-rouges émis par les homéothermes, tel le message sensoriel optique "adressé par" la fleur aux pollinisateurs, telles les bioluminescences, etc..

E) Interceptions biologiques

Enfin l'organisme lui-même peut modifier de façon sensible la structure physique du milieu et devenir un support physique particulièrement important lorsqu'il s'agit d'arbres assurant le support de sols, d'organismes épiphytes et interceptant l'eau, les aérosols, etc (p. 121, 124).

3. Conséquences biolytiques (fig. 3-1)

Les organismes, agissant physiquement et chimiquement sur le milieu, détruisent plus ou moins complètement d'autres êtres vivants. Cette exploitation n'est pas nécessairement trophique, mais peut être due à divers mécanismes de prélèvements, déplacements (tel l'écrasement par foulage), actions mécaniques, et prise de nourriture. En conséquence, pour une écophase il faut distinguer les concepts d'actions biolytiques (= biolyse) (p. 222) et de chaînon trophique car il n'y a aucune relation univoque entre ceux-ci.

La biolyse est avant tout une action d'organismes sur leur biocénose entraînant l'émanation de tissus élaborés (organismes ou/et organes) ou l'excrétion de sucs, par la population subissant ces actions. Elle prend différentes formes, certaines diffuses d'autres liées à une activité de prise de nourriture classable, avec des intermédiaires, en prédateurs, parasites, brouleurs et parasitoïdes. Les organismes acteurs sont les biolytiques et les organismes subissant l'action sont biolysés.

L'adaptation des populations à leur milieu implique également une utilisation de ses ressources. Ces ressources peuvent être d'autres populations ce qui conduit très souvent à certaines adaptations, co-adaptations ou multi-adaptations des populations

entre elles (p. 228). Cet aspect a été très développé dans les ouvrages de biologie écologique qui décrivent souvent des couplages très précis entre deux ou n populations. Nous en indiquons ici quelques modalités.

A) *Biolyse diffuses*

Ces actions peuvent être directement liées à des activités de reproduction, d'élevage ou culture (prélèvement de disques de feuilles par la fourmi *Atta* pour sa champignonnière, nourriture de jeunes oiseaux aux nids, élevages et cultures humaines, etc...) ou de simples conséquences mécaniques de déplacement (ouverture de passage par un rongeur ou foulage du bétail détruisant pour partie les végétaux, etc.).

B) *Biolyse alimentaires*

C'est l'action d'êtres vivants qui détruisent tout ou partie des organes d'autres êtres vivants ou prélèvent dans ceux-ci des éléments susceptibles, après digestion, d'être en partie assimilés par les biolytiques.

La prédation : est une action détruisant totalement la proie dont une partie est ingérée par un phagotrophe (muni d'un tube digestif ou de vacuoles digestives : LWOFF, 1943). Si une partie de la proie n'est pas ingérée, elle est dite non utilisée (NU). La part NU est souvent difficile à distinguer de la biolyse diffuse, les "motivations" des actions de non ingestion pouvant être très diverses. Les prédateurs sont généralement polyphages et même opportunistes (omnivores) (p. 158) en raison de l'hétérogénéité temporospatiale des sources alimentaires.

Ix; parasitisme : est une biolyse ménagée n'entraînant pas nécessairement la mort, ou la mort immédiate, de la source nutritionnelle du biolytique. Cette action peut être faite par des phagotrophes tels le moustique ou des osmotrophes (LWOFF, 1943) tels les champignons parasites. Le parasitisme peut entraîner la mort partielle (d'organes) ou totale d'organismes et souvent à ce stade une cadavérisation d'un NU résultant de cette action biolytique. On distingue les endoparasites, vivant dans l'organisme parasité, et les ectoparasites vivant à l'extérieur.

Le broutement : l'action de certains phagotrophes herbivores voire carnivores, usuellement des animaux, tient à la fois du prédatisme et du parasitisme. Certains herbivores entraînent la mort de la "proie" (granivores par exemple) mais souvent n'effectuent qu'un prélèvement partiel de l'hôte (consommateur de feuilles, tiges) qui régénère ensuite les tissus prélevés. De la même manière, des animaux carnivores broutent littéralement des organes animaux, telles les queues des oligochètes dulçaquicoles ou terrestres (vers de terre) également susceptibles d'une régénération. Ce broutement tient donc de la prédation par la phagotrophie entraînant la mort de l'organe prélevé mais aussi du parasitisme par l'effet démographique (= non mortalité obligatoire de l'hôte).

Le parasitoïde est un organisme implanté dans l'hôte, comme un endoparasite, mais il l'ingère (phagotrophie) graduellement. Il entraîne nécessairement sa mort car il achève son développement en ingérant l'hôte en grande partie. Le parasitoïde est donc un organisme à implantation semblable à un parasite mais à conséquence démographique comparable à celle d'un prédateur (= mort de la proie).

Les effets de la biolyse sur les organismes-hôtes seront abordés au paragraphe suivant.

4. Conséquences biostimulantes

Il s'agit des conséquences physiques et chimiques de l'activité d'organismes favorisant, le développement d'autres êtres vivants.

Les actions biolytiques, en levant certaines compétitions ou amensalismes bloquants, favorisent le développement de certains organismes initialement inhibés ou privés de sources nutritionnelles investies dans des organes vieillissants. La biolyse

accélère notamment le recyclage des éléments biogènes à la manière des organismes stimulant la minéralisation de la nécromasse.

A ces actions, favorisant l'expansion de la vie par accélération des cinèses (bio)chimiques, sont également associées des actions physiques (enfouissement, broyage, déplacement) dont les mouvements modifient les relations spatiales, par exemple celles de microorganismes sous formes quiescentes inoculés sur leurs substrats nutritifs. Dans les écosystèmes ces actions physicochimiques sont globalement des biostimulations.

Une organisation spécifique existe dans le cas des cultures-élevages où l'organisme crée les conditions de milieu favorables au développement d'autres organismes ultérieurement exploitables.

- (l'est le cas des excréments de lombriciens anéciques, qui enrichissent par ingestion un "sol" en matière organique fraîche, puis défèquent et permettent ultérieurement le développement intense de microorganismes sur ces nouveaux substrats.
- (l'est le cas de la fourmi *Atta*, collecteuse de portions de feuilles fraîches pour constituer des meules de culture de champignons.
- C'est le cas des fourmis élevant des pucerons sur les plantes pour en exploiter le miéla.
- C'est le cas évidemment des cultures et élevages humains.
- C'est enfin le cas des relations symbiotiques encore plus étroites (p. 228).

3.5.3. Interactions biotiques (fig. 3-1)

1. Modalités générales

Comme nous venons de le voir, parmi les actions d'un organisme sur le milieu, on peut considérer les effets sur d'autres organismes. Ces actions sont souvent des interactions. Nous verrons d'ailleurs au sujet de l'auto-compétition (p. 227) que cette action peut parfois porter sur l'organisme lui-même, quoique généralement, on considère les interactions homotypiques entre individus de la même espèce et les interactions hétérotypiques entre individus d'espèces différentes.

Ces actions pouvant être physiques (broyage de branches, régulations thermohydriques des champignons par les termites dans certaines termitières, ...) ou/et chimiques (émission ou échange de substances).

Les doublets d'espèces considérées peuvent être jugées comme : 1) n'ayant pas d'interactions, 2) défavorables à l'un des éléments du doublet considéré, 3) favorables à l'un des (ou aux deux) éléments du doublet considéré, 4) neutres : relations neutralistes.

Ces jugements de valeur, parfois documenté au plan des données écologiques, dépendent des modalités d'appréciation mise en oeuvre. Ainsi un herbivore détruisant un organe d'un végétal peut être regardé comme ayant un rôle défavorable pour ce végétal ou au contraire favorable à celui-ci si il lève une auto-compétition (ce raisonnement étant d'ailleurs plus pertinent au niveau d'un peuplement végétal). Ces classements à la fois objectifs (l'herbivore a bien détruit l'organe) et subjectifs (ce qui ne veut pas dire faux : il y a bien à la fois effet négatif et éventuellement positif), ont une grande importance pratique surtout dans les systèmes écologiques optimisés pour une exploitation humaine.

Toutefois, on regroupera ici - en écartant le neutralisme - les actions instantanément défavorables (pour l'un) sous le nom d'antagonismes et, à l'inverse, les coopérations où au moins l'un bénéficie (sans préjudice pour l'autre) de l'interaction.

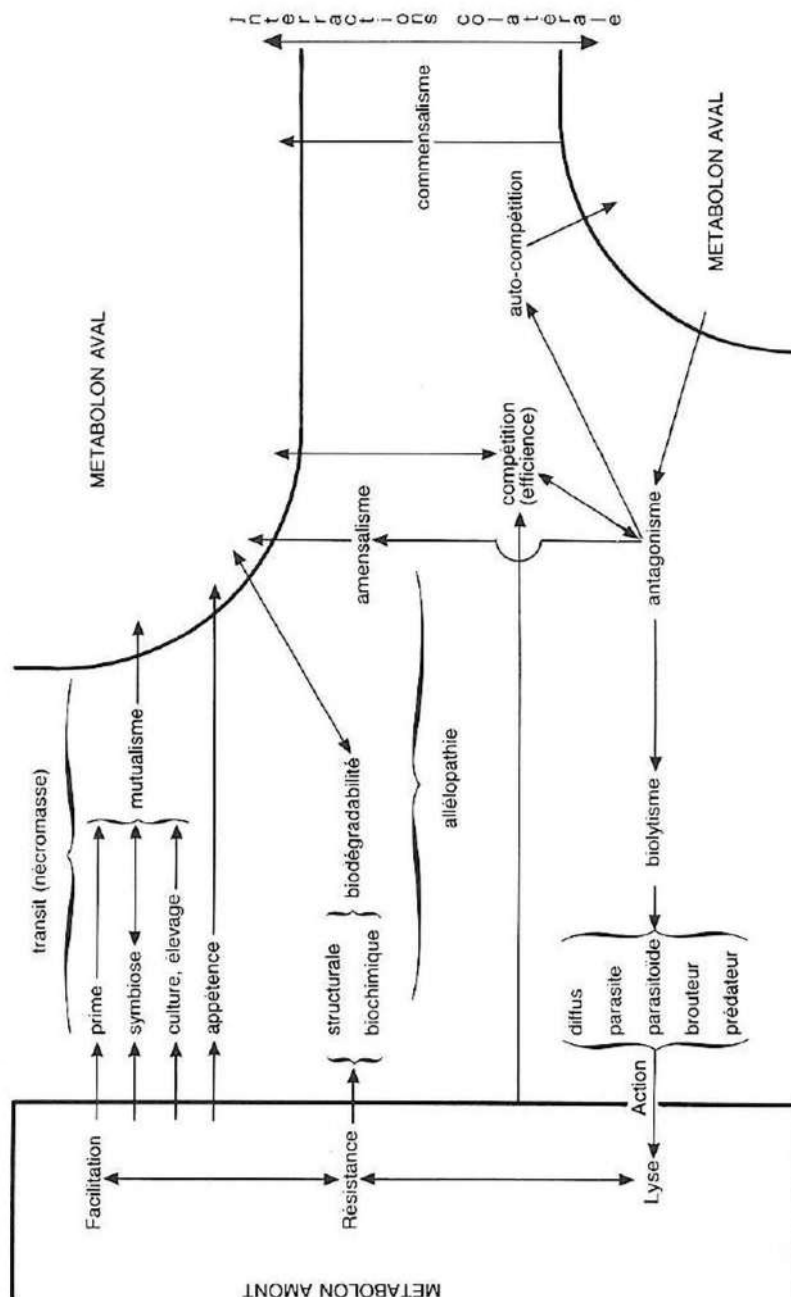


Figure 3-1 - Interactions trophiques et biologiques entre un métabolon amont ("émanations" et, via les transits vers deux métabolons aval compétiteurs. Facilitation et résistance de l'amont où actions antagonistes, allélopathies et mutualismes régissent des transferts dont résultent la compétition et la biodégradation des émanats (voir texte).

2. Antagonismes

A) Compétition

Chaque métabolon, chaque individu, est un sous-système ouvert dans le système écologique où s'assure sa maintenance. *Ipso facto*, les débits d'éléments et d'énergie qu'il assimile ne sont plus disponibles pour les autres métabolons puisant au même endroit, au même instant et à cette même ressource. Ces divers organismes sont en compétition en parallèle.

Certains organismes puisent avant d'autres organismes qui sinon l'auraient fait ultérieurement : c'est le cas des phytophages par exemple qui consomment les feuilles avant que celles-ci puissent aboutir, comme litière, aux nécrophages. Il y a alors compétition en série. Les compétiteurs peuvent être pour partie en parallèle ou pour partie en série.

Ces compétitions (p. 69) s'exercent entre organismes de la même espèce ou d'espèces différentes mais également plus subtilement pour un même organisme. Par exemple, pour la lumière et les éléments nutritifs, un végétal, tel un arbre, tend à utiliser la lumière sommitale au détriment de ses organes inférieurs. Réciproquement, les branches inférieures, les premières élaborées, ont bloqué des éléments biogènes dans leurs tissus qui, n'étant plus biocirculants ni dans l'organisme (ré-allocation) ni dans l'holocénose (minéralisation/organisation), ne peuvent être investis dans de nouveaux tissus. Cette auto-compétition individuelle est levée par la destruction des organes bloquant ce recyclage : des actions létales peuvent alors favoriser l'activité biologique globale de l'holocénose. C'est ainsi que des herbivores valorisent le recyclage du tapis herbacé et, sauf surpâturage, en accroissent l'élaboration (= émanation tissulaire).

La compétition, parallèle surtout, est évidemment importante pour des individus de la même espèce en écophase (p. 204) c'est-à-dire vivant à proximité et ayant des besoins relativement identiques.

Cette compétition intraspécifique devient beaucoup plus modeste, voire strictement nulle, pour d'autres écophases et ceci d'autant plus que celles-ci sont morphofonctionnellement éloignées (telle la chenille phytophage et le papillon nectarivore).

Cet éloignement joue évidemment dans la compétition interspécifique puisque les espèces étant différentes, les besoins ne peuvent être aussi étroitement identiques. Cela n'empêche pas une compétition pour un ou plusieurs objets entre espèces de sorte que les individus, les espèces utilisent dans leur milieu ce qui est disponible (niche trophique réalisée) et non ce qui est abstraitement optimal.

La compétition peut avoir des modalités purement trophiques (A est assimilé par B et donc non C) mais aussi induire des "comportements" antagonistes limitant la compétition trophique par un "déplacement" de l'objet de la compétition. En délimitant son territoire, l'oiseau pratique un partage spatial mais celui-ci inclut les objets de la compétition (site de nidification convenable, par exemple).

La compétition s'exercera avec des moyens différents

1) par efficience. Celle-ci se marquera surtout par les aptitudes décrites aux paragraphes 3.3. et 3.4. et tendra :

la) à l'adéquation précise individu(s)/milieu, par un ajustement précis au milieu y compris par optimisation de la proliféité aux disponibilités trophiques de celui-ci ;

1b) au polymorphisme qui permettra une occupation plus large pour un habitat plus diversifié spatiotemporellement ;

1c) à la diversité spécifique des espèces différentes se partageant plus ou moins conflictuellement un milieu encore plus large et varié ;

2) par amensalisme qui est l'action inhibitrice d'un organisme dans son milieu pour écarter, gêner voire tuer un autre organisme antagoniste, souvent par l'émission

de substances toxiques émises par l'amensal sur l'organisme inhibé. Cette inhibition pouvant entraîner la mort de l'inhibé (dans ce cas l'amensalisme est une forme de biolytisme) ou simplement son arrêt de croissance ou de déplacement vers l'espèce amensale (exsudats racinaires de la Piloselle, odeur du Skunk, chant d'un oiseau marquant un territoire, ...). L'ajustement à une place écologique n'exclut donc pas les antagonismes entre individus génétiquement identiques, proches ou lointains selon la "largeur" (diversité) de la place considérée.

Il y a agressivité dans le cadre des interactions biotiques ayant alors pour fonction d'éloigner les compétiteurs par un mécanisme chimique (*e.g.* antibiose, microbienne, excréats racinaires ou foliaires toxiques, odeur), comportemental (effarouchement, défense du territoire, etc...) ou physique par une défense du "bien" (= objet de compétition) qu'il fût trophique, sexuel, territorial, etc.

B) Biolytes

Mais les antagonismes ne se résument pas aux conflits de compétiteurs. Ils se traduisent aussi par l'action des biolytiques sur les niveaux trophiques en amont pour tendre à se procurer une nourriture, ou détruire un antagoniste, etc. Ces antagonismes ont été abordés avec le rôle des organismes sur le milieu (p. 223).

3. Co-opérations

A l'inverse des antagonismes, des organismes tendent à "s'associer", c'est-à-dire littéralement à co-opérer. Dans cette coopération, il n'y a plus compétition mais un "avantage", un "bénéfice" pour l'un (au moins) des éléments d'un système biologique. Il y a commensalisme lorsque l'on juge qu'une seule espèce (le commensal) tire bénéfice de cette coopération, sans bénéfice ni gêne pour l'autre organisme (l'hôte) : c'est le cas par exemple de la phorésie : un aarien ou une graine, etc. s'accroche à un animal pour son transport sur une grande distance (p. 211).

Le mutualisme, comme son nom l'indique, implique des bénéfices mutuels : par exemple, des fruits apportent une alimentation à un oiseau qui, par transit intestinal, assure la dispersion des graines de la plante (ornithochorie),

par exemple, des fleurs attirent et nourrissent (nectar) un pollinisateur qui assure le brassage génétique de la plante,

par exemple, les exsudats racinaires permettent le développement d'une microflore rhizosphérique stimulant la minéralisation de nécromasse peu labile libérant des phytonutriments assimilables par la plante,

par exemple, les microorganismes intestinaux de nombreuses espèces bénéficient des ingestats et facilitent ou permettent une digestion favorable à leur hôte.

L'association des organismes mutualistes peut devenir relativement étroite dans des symbioses (coopération durable voire constante, à bénéfice mutuel) où chaque symbiote favorise le développement de l'autre pour en tirer à son tour partie. Il y a symbiose intestinale chez certains organismes, le symbiote hôte créant des conditions particulières (organes intestinaux d'accueil, telle la panse, le cœcum, dilatation rectale des termites) et apports de nourriture à une "culture-élevage" endentérienne, en conditions hydriques contrôlées par l'hôte, voire thermiques (chez les homéothermes), les symbiotes accueillis favorisant la vie de l'hôte.

La symbiose devient encore plus étroite chez les osmotrophes (échange d'organisme à organisme sans élément de transit, p. 82) tels les mycorhizes (mutualisme champignons/plantes) soit externes aux racines (ectosymbiose), soit pénétrant dans les tissus de l'hôte (endosymbiose). Elle peut atteindre, avec d'autres mécanismes, à des systèmes biophysicochimiques complexes (DIGHTON *et al.*, 1987). L'endosymbiose serait à l'origine des eucaryotes (p. 188).

On nomme culture ou élevage le mutualisme plus lâche d'un cultivateur-éleveur favorisant par action sur le milieu, le développement d'un cultivé-élevé, tout en l'exploitant (p. 225).

4. "Oo-évolutions"

La dépendance fonctionnelle de deux organismes peut devenir relativement étroite - telle celle de certains insectes hyméoptères et de (leurs d'orchidées (DARWIN, 1870), où il y a un lien fonctionnel étroit, par exemple, entre une plante qui "utilise" l'insecte pour un brassage génétique au prix de dispositifs attractifs (coloration, (orme, odeur) et nutritionnels (= co-opération mutualiste), ou tel le mimétisme, très fréquent dans les relations antagonistes (LEROY, 1974). On constate une co-adaptation mais l'on parle souvent de co-évolution, ces situations suggérant une sélection simultanée des organismes concernés par le mutualisme ou le mimétisme en cause. Il est à noter que la validation de ces interprétations se heurte aux difficultés des études sur l'évolution des systèmes (p. 177) et de ce fait peuvent conduire à des explications opportunistes (p. 42) parfois inutilisables (cf. LABEYRIE, p. 238).

A l'inverse, les effets conjugués d'organismes agresseurs (parasites, prédateurs) entraînent une sélection de mécanismes de résistance des proies et hôtes parasités, telles les épines des plantes soumises à des herbivores dans des conditions où leur croissance ne peut compenser ces prélèvements. On parle alors de co-évolution diffuse. Par exemple, le couple herbes/herbivores, dont les co-adaptations plurispécifiques changent dans l'espace et le temps ; autre exemple, la co-évolution diffuse du couple producteur de fruits + graines/frugivores-semeurs, etc..

De telles interprétations impliquent des connaissances très précises non seulement sur les mécanismes invoqués, mais sur les autres processus concurrents.

En terme de co-évolution, elles impliquent une composante temporelle difficilement réfutable, même indirectement ; par contre, la description des mécanismes de co-adaptation peut parfois être bien cernée et démontrée. Par exemple, les caractères attractifs des fruits des plantes pionnières de la forêt guyanaise présentent une nette dichotomie entre plantes ornithochores et chiroptérochores (dont les frugivores sont principalement, et respectivement, des oiseaux et des chauves-souris). Par exemple, à l'intérieur du genre *Cecropia* (Moracée), les infrutescences, par leurs morphologies, les modalités de fructification des fruits, leurs colorations et odeurs, sont différentes selon qu'elles sont "destinées" au picorement diurne des oiseaux ou à la manducation nocturne des chiroptères (CHARLES-DOMINIQUE, 1986).

3.5.4. Les chaînes trophiques

Les êtres vivants, étant des systèmes ouverts exergoniques, ne fonctionnent (ne sont vivants) que par une entrée quasi permanente d'énergie permettant une dégradation chimique de celle-ci.

Les entrées énergétiques sont de trois origines :

1) Sources chimiques terrestres minérales. Utilisées aujourd'hui par une infime partie des organismes : les chimiolithotrophes aptes à réduire des composés minéraux (telles certaines bactéries). Ces organismes autotrophes (p. 133) ont joué probablement un rôle prépondérant dans les origines de la vie (p. 74) mais sont quantitativement peu importants dans la biosphère actuelle.

2) Sources photoniques. Des organismes autotrophes puisent l'essentiel de leur énergie grâce à la fixation chlorophyllienne de l'énergie photonique solaire sous forme chimique (biochimique). En écologie, usuellement le terme d'autotrophe s'applique à ce groupe "biomassivement" dominant. Ces êtres vivants utilisent des éléments minéraux sans énergie biochimique (CO_2 , H_2O , NO_3^- , NH_4^+ , ...) et forment des molécules organiques riches en énergie grâce à la photosynthèse. Les mécanismes biochimiques de la photosynthèse font l'objet de descriptions de plus en plus précises (p. 135). Ils sont essentiellement développés dans trois grands règnes : les bactéries (cyanobactéries), les protoctistes (algues) et les plantes.

En fait, les autotrophes peuvent, complémentirement à cette fonction globalement fixatrice d'énergie photonique, assimiler des molécules organiques, c'est-à-dire être partiellement hétérotrophes. Ils n'en sont pas moins essentiellement les formateurs de la matière organique à partir de la matière minérale (= organisation). En écologie on définit donc, depuis l'HIENEMANN (1926), les producteurs (de matière organique) comme synonymes d'autotrophes. Plus précisément les producteurs sont les êtres vivants qui assimilent moins d'énergie biochimique (= surtout carbone réduit) qu'ils n'en émanent sous toute forme (gazeuse, liquide, solide) (p. 133).

3) Sources biochimiques. Les hétérotrophes à l'inverse tirent l'énergie nécessaire à leur vie (réactions exergoniques) de l'assimilation de matière organique énergétique. Tout comme les autotrophes, ils sont susceptibles d'assimiler des éléments minéraux, biologiquement non énergétiques. C'est encore leur bilan qui les définit : ils assimilent plus d'énergie biochimique qu'ils n'en émanent.

La nomenclature écologique classique distingue les consommateurs (THIENEMANN, 1926) et les décomposeurs (LINDEMAN, 1942), les consommateurs étant organisés selon un ordre souvent décrit en termes de chaîne trophique. Les consommateurs primaires tirent leur alimentation de végétaux (= herbivores), les consommateurs secondaires sont des carnivores se nourrissant d'herbivores, les consommateurs tertiaires tirent leur subsistance de consommateurs secondaires, etc... Enfin les débris organiques morts, les fèces, etc. sont utilisés par les décomposeurs, qui libèrent les éléments minéralisés.

Ce classement popularisé par ODUM (1959) et son modèle, repris dans de nombreux manuels, a l'avantage d'être didactiquement évident (le lapin mange l'herbe, il est mangé par le renard, ...) mais d'être à la fois opérationnellement inutilisable avec rigueur et scientifiquement faux (p. 158).

Comme ce modèle a été, et est encore souvent, l'une des prémisses de la modélisation holistique "théorique" (p. 395) il est nécessaire de s'arrêter sur ses concepts.

Les concepts de consommateurs et de décomposeurs découlent directement d'observation naturaliste grossière : il est "évident" que les plantes assimilent des solutions minérales (LIEBIG, 1840), il est "évident" que les animaux mangent des végétaux (herbivores) ou des animaux (carnivores)..., le reste s'occupant des matières en décomposition (décomposeurs).

En fait il n'en est rien, l'ingestion n'est strictement pas une assimilation mais un choix alimentaire isolant une portion du milieu extérieur à l'animal dans le tube digestif dont le contenu ne fait pas partie du métabolisme animal (p. 8B) mais respire dans le milieu extérieur. Il ne s'agit que d'une action particulière propre aux êtres vivants ayant un tube digestif ou des vacuoles intracellulaires digestives (= phagotrophes, p. 222). Quant aux assimilats (entrant dans le métabolisme) ils sont toujours abiotiques et issus d'un mélange divers provenant d'un milieu varié.

On distingue en principe et macroscopiquement d'une part les consommateurs se nourrissant de la matière vivante et d'autre part les décomposeurs utilisant de la matière organique morte.

1) Par exemple : la vache est un herbivore, donc un consommateur. En fait, une observation attentive montre que la vache consomme en prairie a) des organes végétaux vivants, b) des feuilles mortes mêlées à toutes les herbes vivantes... parfois uniquement des tissus morts lorsque la végétation est desséchée, c) quelques éléments minéraux, mottes de terre mêlées à cette alimentation.

Mais elle n'assimile pratiquement pas à partir de cela. La vache broie, rumine, et cultive à 37°C dans sa panse une microflore très riche (bactéries, protozoaires, etc.) puis elle digère le tout et assimile... des molécules séparées, désorganisées, "mortes", issues de microorganismes et peut-être de végétaux morts et vivants, voire de fractions minérales.

L'hiver enfin, la vache, hors-prairie, ne consomme "que" des végétaux morts (le foin)...

2) Par exemple : le ver de terre est un "décomposeur" digérant la terre, la matière organique morte dispersée et les organes morts de la litière... Mais en fait pénètre dans son tube digestif une importante microflore vivante qu'il détruit et stimule par des actions mécaniques, un brassage, l'apport de diverses protéines, etc. et il digère des molécules mortes, désorganisées, isolées, assimilables, issues d'algues, de la nécromasse non identifiable, des microorganismes digérés, etc.

3) Par exemple, la hyène est un carnivore qui ingère des cadavres en décomposition... ce en quoi elle ne diffère pas du renard ou du lion qui ingèrent des cadavres frais mais morts. Le renard étant par ailleurs frugivore, ...

De toute évidence ni à l'ingestion (cas particulier des consommateurs phagotrophes) ni surtout à l'assimilation, ce qui serait comparable avec les producteurs, les consommateurs ne peuvent être caractérisés par la nature de leurs ingestats ou/et assimilais. Le concept de consommateurs ne peut valablement s'opposer à celui de décomposeurs et les modèles holistiques idéels fondés sur cette "distinction" sont en pratique nécessairement arbitraires. Ils jouent un rôle négatif en repoussant la véracité scientifique.

11 faut abandonner cette distinction (p. 157) ; on peut conserver le terme de consommateurs comme synonyme d'hétérotrophes (= assimilant plus d'énergie biochimique qu'ils n'en émanent) et reporter à leurs vraies places les actions sur le milieu (p. 222) dont les interactions biotiques (p. 225).

3.5.5. Descriptions fréquentielles

Les caractéristiques morphologiques, morphofonctionnelles ou écophysiologiques d'adéquation des sous-ensembles biologiques avec leur milieu, peuvent être appréhendées au niveau individuel (p. 206), populationnel (p. 214) ou biocénotique (p. 218). Le biologiste écologue tend - depuis quelques années surtout et corrélativement avec les développements de l'informatique classique (p. 341) augmentant la puissance des moyens de calcul - à quantifier les organes ou organismes ; c'est quantifier dans l'espace-temps l'objet central de sa spécialité.

La forme prise par de telles études est très variable mais peut se rapporter à des répartitions spatiales des taxons considérés, à des successions temporelles de ceux-ci ou à des combinaisons spatiotemporelles, voire à la description (partielle) de l'hémisystème biocénotique. D'une façon générale, il s'agit de dénombrement d'individus (parfois d'organes, en botanique surtout) et rarement de masses (biomasses). Le fait de pouvoir exprimer les données sous forme numérique constitue un progrès considérable car il permet d'organiser des interprétations sur la base de modèles mathématiques reflétant des propositions, hypothèses essentielles aux synthèses opérationnelles (p. 42, 344).

Cette étape de mathématisation des interprétations écobioécologiques a un succès certain pour diverses raisons au nombre desquelles il faut noter

- 1) une formalisation ouvrant à des lests, même très partiels,
- 2) la possibilité de ré-utiliser, sous un habillage sémantique moderniste, de vieilles données et des concepts classiques (cf. "stratégies de publication" de BARBAULT, 1987),
- 3) la perspective d'une meilleure intégration des connaissances biologiques d'un taxon particulier (Blondel, 1987),
- 4) la possibilité d'exprimer des idées sur la nature sous une forme empruntant une caution scientifique à la mathématique.

Ces efforts ont marqué un incontestable progrès vers une écologie explicite décrivant en termes de science exacte <<les **relations des organismes avec leur milieu extérieur environnant**>> car il s'agit d'un pas vers l'indispensable synthèse systémique (chap. Vil) devant passer par des interprétations numériques (chap. VI).

Toutefois, en écologie, ces études biologiques ne peuvent généralement s'appliquer en dehors du domaine où elles ont été forgées car elles reflètent congénitalement les options spécifiques qui les ont motivées. En général, elles se heurtent aux limites suivantes :

1) Elles sont fréquemment fondées sur des dénombrements d'individus, voire d'espèces, ce qui implique que ces individus et taxons soient écologiquement homologues. Seule l'application à une luxocénose assez homogène pour se confondre "approximativement" avec une somme d'organismes en écophase est donc "approximativement" applicable (cette approximation pouvant être d'ailleurs objectivement appréciée par méthodes multivariées, p. 246, 367). Il est opérationnellement impossible de confondre un *Séquoia*, un Collembole, et un *Mycoplasma pneumoniae* tant en nombre d'individus, qu'en distribution spatiale, qu'en "fonctions". Cet exemple caricatural ne doit pas masquer l'énorme écart qui subsiste entre un *Séquoia* et un *Prunus* ou même deux individus de la même espèce appartenant à deux sous-espèces géographiques.

2) Les approches "théoriques" sont très souvent largement des vues de l'esprit (relation d'un prédateur et d'une proie ou encore compétition de deux espèces... à l'exclusion de toute autre interaction biotique). Elles sont illustrables en microcosmes (boîte de Pétri ou autre) mais n'existent pratiquement jamais dans les systèmes écologiques. Les formules théoriques qui en découlent ne sont au plan écologique que supputations généralement non réfutables car non observables hors de microcosmes artificiels.

Ces concepts "théoriques" n'ont pas trait qu'aux relations biotiques, mais aussi à l'espace "homogène" (p. 38), négligeant usuellement les écotones/gradients de l'espace-temps. Ceci limite leur usage essentiellement aux modélisations conceptuelles et études de potentialités (p. 400).

3) Focalisées sur les organismes et ne prenant en compte que des sous-systèmes, ces approches renvoient, en "boîtes noires" les éléments du milieu décrits en termes globaux non opérationnels (tels la "pression de sélection", les conditions "favorables", le milieu "perturbé". ...). Si les sous-systèmes biologiques sont pris en compte numériquement, les "interprétations" de leur structure ou/et variations temporo-spatiales *versus* leurs milieux relèvent de supputations (pas nécessairement inexactes mais opérationnellement non testables (p. 237).

En conséquence, de très nombreux concepts écobioécologiques, usuellement extrapolés sans aucune preuve à l'écosystème biophysicochimique, telles la diversité, la régularité, l'homogénéité de la distribution de quelques Laxocénoses font l'objet de **nombreuses descriptions <<As in many ecological concepts, diversity is an intuitive concept whose origin is in field observations and data. It is not surprising that various definitions are found in literature (DENNIS et al., 1979). HURLBERT (1971), in calling it a non-concept, goes further by doubting its utility. However, he agreed that if it is to be given some kind of usefulness, diversity must be a function of the number of species (richness), and of the regularity of individual distribution among the species (regularity or equitability, CANCELA DA FONSECA, 1982)>> (BETSCH et CANCELA Da FONSECA, 1984.**

Les descriptions écobioécologiques fréquentielles sont l'objet de nombreux travaux spécialisés en raison de leur développement récent (lié à l'informatique classique) et sont appelées, lorsqu'elles seront replacées dans le contexte écologique, à contribuer à l'écologie opérationnelle de façon sensible, ne serait-ce qu'en raison de ce développement.

Au niveau des Systèmes-Experts, certaines théories écobioécologiques pourraient, après décanation de leurs pré-supposés arbitraires, jouer également un grand rôle dans l'élaboration des Bases de Connaissances écologiques. Elles ne sauraient donc être négligées par l'écologue.

En raison de leur extrême diversité (liée à leur portée limitée à des domaines biologiques restreints), il ne peut être question de les exposer ici.

3.5.6. Répartition, succession et diversité

La répartition spatiale des organismes est l'objet de descriptions de répartition (géonémie ou chorologie) et d'essais d'explication (biogéographie) à partir du milieu (mésologie) des organismes. Ces répartitions peuvent être étudiées au niveau individuel (territoire d'un individu), d'une population, de l'aire d'une espèce, ou d'un peuplement.

Au niveau des peuplements, de nombreux travaux tentent d'abord d'établir un classement de ceux-ci, en général pour un taxon donné (par exemple pour les plantes phanérogames : types écologiques, associations végétales, phytocénoses, etc.).

Les unités de classement taxonomique et cénotique étant établies, la répartition de celles-ci est décrite puis comparée, le plus souvent à quelques variables (températures moyennes, humidité, isolement géographique) pour tenter d'expliquer ces répartitions. Pour cela, il est nécessaire d'ajouter une dimension temporelle qui explique l'état observé et introduit l'idée de succession ; on parle, sur de grandes périodes historiques, de paléogéographie.

En un lieu de l'espace, diverses espèces cohabitent mais cette situation est métastable, certaines espèces peuvent disparaître, ou au contraire devenir très abondantes, de nouvelles peuvent arriver, de sorte que la cénose se modifie. On nomme succession la suite temporelle de la structure (de l'état) de la cénose.

Tenu compte des innéats quasi constants des systèmes écologiques locaux (substrat édaphique, hydricité, conditions climatiques moyennes), très tôt l'idée s'est imposée que spontanément les biocénoses tendent vers une situation d'équilibre métastable, le climax, par des stades intermédiaires appelés successions primaires.

Si des aléas importants interviennent, cet état climax peut être quasi détruit et partant de cette nouvelle situation, une succession secondaire tendra à se constituer.

La diversité des organismes est étudiée à divers niveaux.

Celui de la diversité des biocénoses d'un écosystème, généralement observée pour une seule taxocénose, telle celle des phanérophytes dont on exprime le nombre d'espèces par unité de surface. Celui de la variété des écotypes d'une espèce dans les divers milieux où elle trouve place. Celui de la plasticité génotypique et du polymorphisme (p. 216) observé localement dans une espèce, y compris le degré de diversité des allèles.

Ces divers niveaux sont en quelque sorte "emboîtés" en ce sens que pour une portion d'espace métrique, sa diversité intrinsèque (écologique = toutes variables biophysicochimiques comprises) implique une diversité spécifique, individuelle et allélique globale en tant que corollaire de la situation des sous-systèmes biologiques dans les systèmes écologiques. Cette considération spatiale vaut aussi pour le temps et a des conséquences considérables du point de vue de la gestion des espaces sous l'influence actuelle de l'homme (p. 485).

3.6. L'interprétation des organismes

3.6.1. Interfaces systémiques et classifications interprétatives

Nous avons vu (p. 63) que les systèmes écologiques étaient des intrications intimes de vie et d'abios et que les écosystèmes se structuraient comme des successions de compartiments biotiques (métabolons) et abiotiques (transits) (p. 82).

On peut regarder également cette organisation en tant que système général incluant des sous-systèmes eux-mêmes incluant des systèmes plus réduits. Nous avons déjà vu au niveau de l'écosphère que celle-ci est constituée d'écosystèmes locaux (holocénoses) échangeant entre eux et qu'un continuum existe entre pieu et écosphère. Nous avons également vu que l'on peut subdiviser l'holocénose en sous-systèmes écologiques (syntégrons) (p. 192).

Dans ces systèmes les unités fonctionnelles que sont les organismes apparaissent comme des sous-systèmes "totalement" dépendants des échanges avec l'abios, mais ayant acquis par rapport à cette dépendance une certaine homéostasie (= autonomie). 11 s'agit de se soustraire pour partie aux dépendances par une autorégulation pour assurer la continuité vitale (p. 204) de ces systèmes grâce à l'information écobioologique (p. 90).

C'est dire, en systémique, qu'une population se maintient grâce aux innés biologiques (individus des populations), génétiques (ADN) et culturels (éducations) qu'à chaque instant elle reçoit de son état antérieur et transmet (s'il y a survie = continuité) à l'instant suivant (I-générateurs) (p. 96). Ceci conduit au classement phylogénétique où l'on s'efforce d'ordonner les organismes d'après leur parenté, à partir de l'information que nous laissent leurs innés et les traces fossiles.

Mais ces organismes, ayant une aptitude intrinsèque d'adaptation, n'en restent pas moins des sous-systèmes recevant des exnéats de toute nature à partir des systèmes écologiques où ils s'inscrivent.

Les ensembles biologiques considérés en biocénétique ne sont pas écologiques car, comme nous l'avons vu au paragraphe 3.5.1., la biocénétique ne permet pas une vraie systémique en raison de l'interférence constante, dans les échanges biocénétiques, des éléments de transit abiotique ; il y a non connexité des composants biologiques entre eux.

On peut essayer, par comparaison des relations actuelles milieux/organismes, de classer les organismes ayant présentement des identités relationnelles : ce sont les classements écobioologiques.

Alors que les classements phylogénétiques cherchent à dégager la parenté (la généalogie) d'organismes qui peuvent être devenus systématiquement très différents, les classements écobioologiques cherchent à souligner les homologies systémiques, ce qui est très important opérationnellement. Autant en phylogénèse il faut écarter les convergences - prises parfois à tort pour des parentés - autant en écobioologie systémique, il faut regrouper les convergences indépendamment du degré de parenté. Mais ces deux modalités de classement, à objectifs distincts, impliquent des interprétations dont les • difficultés historiques (pesant surtout sur l'étude phylogénétique) ont été déjà discutées (p. 179). L'interpolation ou l'extrapolation de données (p. 350) et de propriétés fonctionnelles entre organismes est d'autant moins risquée que cette homologie systémique est grande. On parle parfois de vicariances pour des homologies systémiques supputées, mais la preuve de l'identité relative du rôle réel n'est usuellement pas démontrée.

L'interprétation écobioécologique des organismes devrait donc se faire par une comparaison entre les propriétés intrinsèques des organismes et les propriétés des systèmes écologiques où ils s'inscrivent. Souvent il n'en est rien pour diverses raisons :

1) le biocentrisme : les études, portant sur les organismes, sont faites par des biologistes, qui ne prennent que très imparfaitement en compte les aspects abiotiques, trop périphériques à leurs préoccupations,

2) la double spécialisation : il y a spécialisation sur le matériel, et spécialisation sur les modalités d'étude du matériel.

2a) Pour être opérationnel, le biologiste travaille, parmi les millions d'espèces intervenant dans les systèmes écologiques, sur un groupe taxonomique restreint lui imposant une problématique et des modalités opérationnelles très restrictives. Par exemple, il y a généralement de grandes différences entre l'abord d'un microbiologiste et celui d'un zoologiste et parmi ces derniers les préoccupations de l'éthologiste des singes ne ressemblent en rien à celles d'un spécialiste des polychètes marins.

2b) La spécialisation s'impose aussi comme source de particularisme entre le biologiste moléculaire étudiant les modalités de la méthylation d'une molécule et l'écobioécologiste tentant d'apprécier l'impact d'un parasite sur une population d'hôte,

3) les carences systémiques : celles-ci résultent de l'impossibilité matérielle, jusqu'à très récemment, de décrire scientifiquement tant les systèmes biologiques que leur participation, comme sous-systèmes, aux systèmes écologiques.

Dès lors la situation de chaque travail et son apport concret aux connaissances, ne s'inscrivant pas dans une synthèse concrète, sont "appréciées" à travers le désir inassouvi de tout spécialiste, et encore plus de tout politicien de la science, de dégager quelques "synthèses", paradigmes ou "théorie fédératrice" résumant les éléments disjoints d'un puzzle dont il manque l'essentiel des pièces. Cela laisse libre cours aux lobbies et modes aussi stériles que source de gaspillages.

Même en ne retenant que l'aspect restreint des seules études biologiques des populations, ce besoin s'exprime clairement sous la plume de LEGAY (1987) en introduction à un colloque sur la "biologie des populations" où biologistes et écobioécologistes se côtoyaient : **<<Nous avons tout, ou presque tout, à apprendre au niveau populationnel d'intégration. A une époque où la mode scientifique remplace parfois la politique scientifique, je voudrais affirmer que nous aurions tort après quelques satisfactions et quelques très brillants résultats de ne pas poursuivre un effort en profondeur dans notre domaine.**

En particulier, nous avons besoin d'un vocabulaire commun ; c'est la première des exigences du fondement d'un nouveau domaine scientifique. >>.

En ce qui concerne l'écologie, cette situation pourrait changer - c'est l'objet de cet ouvrage - à la condition du développement d'une élaboration commune où tout spécialiste fait son apport spécifique. Ces modalités seront développées en 2ème partie et, dans la mesure où elle est écobioécologique, l'interprétation biologique s'y inscrit nécessairement.

Considérons la situation fonctionnelle d'un organisme (individu) et les interfaces systémiques régulant le fonctionnement de cet organisme.

1) L'interface méso-individuelle est l'interface entre cet individu et son milieu biophysicochimique en fonction du temps (la durée de sa vie) et de l'espace (s'il y a des écophases mobiles). Les diverses caractéristiques morphologiques et physiologiques de l'individu lui permettent une intégration comme sous-système au système écologique général auquel il appartient (= son milieu, p. 32).

En pratique, ce milieu peut être appréhendé par un nombre illimité de caractéristiques, (tout dépend de l'analyse).

En pratique, les caractéristiques morphofonctionnelles de l'individu sont également analytiquement illimitées.

Il s'en suit que l'étude exhaustive de la cohérence individu-milieu est pratiquement irréalisable. Les options (p. 41) sur les caractéristiques milieu et

individu pèseront très lourd pour l'objectivité, puis pour la pertinence scientifique des interprétations sur cet interface.

2) L'interface génético-individuelle est-le contrôle effectué par le code génétique parental (reçu des parents) (le génotype) sur l'individu et, d'une façon plus complète, par les innéats biologiques. Entre ce code moléculaire et la régulation du système-individu complet, de très nombreux processus physiologiques et exnéats interfèrent. L'individu réalisé, le phénotype, est un reflet de ce génotype, reflet modifié par les relations méso-individuelles.

Le génome est lui-même un extraordinaire imbroglio moléculaire d'ADN, organisé en codons, permettant la production de protéines (p. 80) essentielles aux régulations de l'individu. Toutefois, il y a chez les eucaryotes de nombreuses séquences "inutiles" ou silencieuses qui joueraient un grand rôle évolutif potentiel (voir, ci-dessous l'interface individu/population), mais un rôle immédiat faible ou nul.

Cette remarquable richesse codifiante fait que nous ne pouvons pas plus décrire exhaustivement le génome que les caractéristiques individuelles et donc les relations entre modifications génétiques et états de l'individu, sauf dans le cas de troubles génétiques graves imputables à une cause précise. Il est par contre très difficile de connaître toutes les conséquences d'une modification d'un ADN, modifiant un allèle dont la protéine peut ne pas être de fonction univoque. Sauf cas pathologiques particuliers, la description exhaustive des interférences systémiques entre modifications génétiques et propriétés de l'individu est directement inapplicable. Ici aussi les options analytiques sur caractéristiques génotypiques et celles de l'individu pèseront lourd sur la pertinence des interprétations.

3) L'interface démo-individuelle

A un moment donné les deux contrôles méso-individuel et génético-individuel, l'un et l'autre indescriptibles exhaustivement, s'exercent sur la réalisation de l'individu (réalisation = croissance, reproduction, activité, mort, ...), c'est-à-dire son interface avec son milieu (interface méso-individuelle) et son code d'organisation (interface génético-individuelle). Les dimensions temporelles, populationnelles et spatiales sont en outre données par la transmission parentale (fonction spatiotemporelle) de gènes et par les recombinaisons sexuées et multigéniques (polyploidie, duplication des gènes, recombinaison, ...) permises par les échanges de gènes entre individus à l'occasion de la reproduction sexuée. Ajoutons à cette information, les effets d'apprentissage chez certains êtres complexes.

Chaque individu apparaît ainsi comme une copie parentale ("identique à l'espèce") et comme une combinaison particulière (différente dans le détail) dont les plus inadéquats (tels les monstres) seront inaptes à s'inscrire dans leur holocénose et dont certains s'avèreront suffisamment adaptés à celle-ci (telle qu'elle est au moment de leur vie) pour atteindre à la reproduction. La sélection naturelle est l'effet de cette adéquation individu-milieu de tous les instants, conduisant à ne rendre possible à travers les générations que les formes adéquates à leur milieu (sur-système).

L'adéquation toujours très multidimensionnelle de génomes tous différents à des environnements tous différents, permet le maintien de parents (une fraction de leur génération, la plus adaptée à leur propre vie, y compris les événements rares) qui seuls transmettent leurs caractéristiques (p. 184). Ici aussi l'étude exhaustive impliquerait de connaître les caractéristiques mésologiques et génotypiques globales dans tous les individus de l'espace et le temps : des options réductionnistes, lourdes de conséquences, s'imposent opérationnellement.

En conclusion, l'étude de relations causales entre mutations, phénotypes de l'individu, adéquation au milieu et conséquences populationnelles se heurte à l'interférence de trois interfaces systémiques toujours décrites de façon très incomplète. La prédictibilité d'une modification d'un facteur mésologique ou d'un gène sur une population implique une connaissance généralement inabordable, sauf les cas "catastrophiques" (inondation d'un milieu normalement exondé, gène délétère, ...). Les autres effets (par exemple un parasite augmentant sa fréquence temporairement

dans un cortège parasitaire et agissant sur la démographie d'un hôte dépendant de nombreuses autres variables) relèvent par contre d'études subtiles où la démonstration est rarement probante au point de se prêter à une réfutation. Ceci laisse nécessairement une grande place aux supputations qui, si elles ne débouchent pas sur des hypothèses testables, peuvent avoir des conséquences antiscientifiques non négligeables.

Surmonter ces difficultés concerne autant l'écologue que le biologiste. C'est tenir compte dans l'interprétation des organismes, donc dans leur contribution aux écosystèmes, de l'extraordinaire complexité de leur situation systémique réelle au présent (p. 133) et dans le temps (p. 177).

Les réductionnismes biocentriques, découlant des spécialisations diverses, entraînent des difficultés d'interprétation qui ne sauraient être éludées car elles influencent nombre de supputations écologiques jouant un grand rôle dans les interprétations de classement des organismes. Ces classements privilégiant les fonctions actuelles et les maillons présents d'une part (p. 241) ou, d'autre part, tendant à dégager comment dans le passé ces organismes sont arrivés à la situation actuelle (phylogenèse) (p. 250), tentent de référer les organismes respectivement à leur place écologique et à leur taxon. Il faut donc en connaître à la fois la valeur et les limites.

3.6.2. Limites des interprétations

< < Pangloss enseignait la métaphysico-théologo-cosmolonigologie. Il prouvait admirablement qu'il n'y a point d'effet sans cause... Il est démontré disait-il, que les choses ne peuvent être autrement : car, tout étant fait pour une fin, tout est nécessairement pour la meilleure fin. Remarquez bien que les nez ont été faits pour porter des lunettes, aussi avons-nous des lunettes... et les cochons étant faits pour être mangés, nous mangeons du porc toute l'année : par conséquent ceux qui ont dit que tout est bien ont dit une sottise, il fallait dire que tout est au mieux> >. (Extrait de *Candide* ou l'optimisme, VOLTAIRE, 1759).

Les naturalistes furent longtemps émerveillés par l'extraordinaire adaptation des organismes à leur environnement. Ils constatèrent sur des cas particuliers et firent l'effort de démontrer, en biologistes, la co-adaptation de deux organismes. Partant d'optiques spécialisées, ces coïncidences furent soulignées comme co-évolutions "prouvant" l'évolution. Cette démarche est *a posteriori* paradoxale, l'évolution ne devant pas être prouvée mais déduite de la continuité vitale pour des raisons thermodynamiques simples (p. 203), alors que les arguments relatifs à des co-adaptations supposées peuvent être fort suspects.

De ce point de vue, les exigences thermodynamiques des écosystèmes terrestres facilitent les attitudes tautologiques : un être vivant, pour vivre, c'est-à-dire se comporter en sous-système du système d'échange où il s'inscrit, doit être cohérent avec celui-ci : lui appartenir. Pour se maintenir il doit être reproduit en surnombre et la génération suivante sélectionne statistiquement "les meilleurs". Ce truisme favorise un certain panglossisme.

Trop souvent on tient pour démonstration le fait qu'à une caractéristique mésologique, jugée comme essentielle par le spécialiste, "correspondait" une caractéristique physiologique, voire génétique et que ceci "démontrait" l'adéquation de l'une à l'autre.

C'est en effet passer d'une interprétation globale population-milieu, dont la preuve est apportée par la vie même, à un choix réductionniste de quelques traits parmi de multiples caractéristiques ; la pertinence de ce choix n'est pas démontrée. C'est violer la connexité systémique (p. 93). L'absence de maîtrise de la connaissance des 3 interfaces, décrites au paragraphe précédent, interdit en fait d'établir une relation univoque entre une caractéristique individuelle et un facteur mésologique (et réciproquement).

Si la nécessaire cohérence des sous-systèmes biologiques avec leur système-milieu découle de leur existence même, l'interprétation de modalités analytiques particulières ne saurait se réduire au rappel omniprésent de cette évidence.

L'adéquation d'organismes, individus ou populations à leur milieu, les interactions particulières entre couples d'organismes (insectes fécondeurs-fleurs de phanérogames, symbiotes), ou entre organismes et environnement physique, ont conduit à de multiples interprétations décrivant la cohérence de la nature, en termes parfois convergents, parfois contradictoires. L'extraordinaire diversité des approches et des points de vue, portant souvent sur les relations de une ou deux espèces dans le cortège des milliers d'espèces existantes dans un contexte physicochimique sommairement décrit, ne saurait être exposée ici car il s'agit presque toujours d'études particulières où l'habileté, le flair et l'expérience suppléent la carence d'études systémiques réellement intégrées.

Les approches paucifactorielles, ne pouvant intégrer les multiples variables effectivement en jeu, s'appuient alors sur un choix "critique" de variables que le spécialiste d'un groupe particulier d'organismes pense (et parfois sait) être importantes. Puis les résultats obtenus soulignent les corrélations et évoquent une "interprétation" de mécanismes souvent non observés car hors de portée. C'est le lot commun de nombreuses interprétations ayant trait aux habitats, modes de vie, adaptations, valeur adaptative d'un gène ou d'un caractère morphologique, ... Ces interprétations, qui visent à l'adhésion par consentement mutuel, ne sont que des hypothèses (qui peuvent être "vraisemblables").

Devant l'écrasante diversité des situations locales, l'extraordinaire richesse en espèces et enfin les infinies variations individuelles dans l'espace et le temps, le bioécologue est confronté à de sérieux problèmes. Ceci pousse au désir de théorie(s) synthétique(s), pourtant impossibles à fonder objectivement à partir d'une telle approche (p. 105, 450, 460).

Les classiques démonstrations relatives à l'adaptation des organismes (ou des caractères de ceux-ci) avec leur milieu (par exemple, la stratégie r et les milieux "instables", ou K et les milieux stables) apparaissent comme des tautologies d'autant plus nettes que la mesure de "stabilité" est subjective, c'est-à-dire argumentée à la demande (ce qui ne veut pas dire que l'appréciation soit fausse). En d'autres termes, on démontre avec les arguments mis en avant : il y a bien tautologie.

On peut certes sélectionner des cas particuliers et, espérant leur valeur générale, les étudier puis essayer de les généraliser. Encore faut-il préciser d'un point de vue opérationnel, la "valeur générale", et par rapport à quel système d'appréciation. Il n'est pas rare de voir que l'on est loin de cette situation comme le dénonce avec clarté et humour LABEYRIÉ (1986) : **<< Dans ces conditions, comment accepter certains feuillets scientifiques qui envahissent les revues bien pensantes : Evolution, Ecology, dans lesquelles le programme adaptationniste baigne dans de l'eau de rose et prétend même rendre compte des structures et des activités d'espèces différentes mais entraînés dans la sarabande coévolutive : les coadaptations quittent les pièces génitales pour envahir les chaînes trophiques.**

Certes, la coévolution est le corollaire des relations trophiques ; mais, que les espèces n'aient pas évolué isolément, n'implique pas pour autant qu'elles aient un programme génétique commun coordonnant leurs évolutions. L'escalade coévolutive intervient dans les choix, elle ne les provoque pas. Pour qu'il y ait orientation des choix, il faut qu'il y ait pression de sélection. Est-ce toujours démontré ?

Peut-on envisager une pression de sélection du séminivore *Bruchus affinis* sur des plantes vivaces, comme *Lathyrus sylvestris* ou *Lathyrus latifolius* quand seule une infime partie des boutons donne des gousses, dont de nombreux ovules avortent ? Peut-on l'envisager lorsque la multiplication végétative est très active et les germinations peu nombreuses ? Aucune hypothèse solide ne peut être émise sans un bilan complet. La bruche quant à elle, ne rencontre apparemment aucun obstacle mécanique ou chimique, mais par contre distribue sa progéniture dans ce qui semble de mauvaises conditions.

Peut-on mesurer "l'allocation des ressources", "le coût énergétique", "l'investissement en gamètes mâles ou femelles", quand tant de structures avortent, quand tant de larves sont vouées à la mort ?

Quoiqu'on pense ceux pour qui les organismes ont des stratégies, les structures, les activités, sont liées à des héritages ; elles ont pu avoir une importance, dans d'autres circonstances.

Avec un minimum d'imagination, toute analyse parcellaire peut conduire à des interprétations... et après !> >.

Aux tentatives particulières d'études fines de mécanismes, s'opposent des conceptions holistiques s'efforçant de décrire les traits généraux propres à des ensembles d'êtres vivants. Très tôt par exemple, les naturalistes ont été conduits à constater la convergence de certains types biologiques dans des "milieux identiques" (tels les dauphins et les poissons). Ces convergences ne sont pas fortuites mais résultent bien d'adaptations ; leur vie le prouve seule.

Ces observations conduisent alors à dégager des types biologiques... plus ou moins précis, ayant des propriétés relativement mieux définies que leurs milieux souvent mal définis... car ce sont des études d'abord biologiques.

On note alors des exceptions ... qui à leur tour font l'objet d'un discours interprétatif... qui souffre de nouvelles exceptions, objets d'une explication particulière, etc. On assiste souvent à un discours interprétatif où les arguments mis en jeu répondent, par leur diversité, à la diversité des cas particuliers, des exceptions, des irrégularités. La flexibilité de ces théories opportunistes les rend assez polyvalentes pour se soustraire aux critiques concrètes, pour ne pas être réfutables : ne plus être scientifiques. < < **Nous ne critiquerions pas aussi vigoureusement le programme adaptationniste si son invocation dans chaque cas particulier pouvait, par principe, conduire à son abandon lorsque les preuves en sa faveur feraient défaut.**

Malheureusement, l'adhésion des biologistes au programme adaptationniste fait que celui-ci n'est jamais rejeté de cette façon, et ceci pour deux raisons.

Premièrement, si une explication adaptative se montre fausse au cours d'un test, on la remplace par une autre. Autrement dit, le programme adaptationniste conduit constamment les biologistes à inventer des histoires adaptatives. Or le domaine des histoires adaptatives est aussi vaste que notre esprit est fertile. De nouvelles histoires peuvent toujours être avancées et si une histoire n'est pas immédiatement disponible, on peut toujours plaider l'ignorance temporaire et espérer qu'une d'entre elles viendra plus tard.

Deuxièmement, les critères servant à déterminer l'acceptabilité d'une histoire sont si vagues que beaucoup de ceux-ci passent sans avoir été réellement confirmés. Souvent les évolutionnistes se servent de la compatibilité avec la sélection naturelle comme seul critère et considèrent que leur travail est fait lorsqu'ils ont concocté une histoire plausible. Mais des histoires plausibles peuvent toujours être racontées et les biologistes se montrent dans ce domaine beaucoup moins exigeants que les historiens. > > (GÜLD et LEWONTIN, 1982).

Cela ne signifie pas que l'énorme effort de synthèse indispensable autour de ces hypothèses soit vain, mais que l'élaboration de prédictions permettant des tests de vérification par exclusion d'hypothèses s'impose. Que les organismes soient adaptés est un truisme ; que tel mécanisme précis de relations organisme-milieu corresponde à telle caractéristique particulière est autre chose.

En fait, devant la diversité des faits écobioologiques et la faiblesse des moyens de synthèse opérationnels, une certaine insatisfaction est exprimée en permanence par tout écobiologue conscient de la disparité des faits devant la faiblesse des synthèses. D'où la recherche de quelques "théories" susceptibles d'élever la cohérence de la discipline. On assiste alors à la proposition de "théories" qui, pour peu qu'elles "permettent en premières approximations" une adéquation avec certains faits biologiques, jouent le rôle de mode, de moteur, de "théorie explicative" élevée au rang

de paradigme, ou tout autre usage abusif sanctifiant une énoncé lyrique de bien maigres propositions.

Car si le besoin est évident, les propositions sont invariablement, après une période de récupération consensuelle de quelques groupes d'écobiologistes, rejetées par les abus même de l'usage de la dite "théorie". Si encore une nouvelle théorie incorporait la précédente en l'améliorant, nous assisterions à un processus d'intégration progressive comparable à ce que la physique nous a montré en expliquant la théorie newtonienne par la théorie plus générale de la relativité restreinte ... Mais il n'en est rien et il ne peut en être rien pour des raisons évidentes mais constamment éludées, que nous avons développées au plan écologique (p. 24, 40).

- Trop de théories ne sont que des explications opportunistes (— *ad hoc*), leur flexibilité leur permet une adéquation souple à des faits nouveaux mais, en conséquence, leur retire toute réfutabilité.

- Ces explications opportunistes peuvent toutefois engendrer des heuristiques, qui peuvent guider le choix de problématiques (chap. VII) dans lesquelles des propositions réfutables, seules opérationnelles vis-à-vis du champ écologique, pourraient être dégagées, si le poids du réductionnisme historique est annulé.

- Ces explications sont en effet biocentriques pour leur écrasante majorité. Les diverses "théories écologiques" ne recouvrent pas de façon équitable l'abios et la vie mais, produites par des biologistes étudiant dans le cadre naturel un objet biologique, celles-ci reflètent le réductionnisme historique (p. 30) de la discipline. Ici les pièges sont "bien tendus" tant ils sont involontaires, car consensuels entre biologistes.

Par exemple, il est tout à fait classique d'évoquer les "lois" de Lokta-Volterra en démographie ; celles-ci portent sur les seules aptitudes potentielles de reproduction des populations. Cet hémisystème n'intègre pas le système écologique où se trouve chaque individu de cette population. Seul le système d'échange écophysologique individuel permettrait une certaine expression de la croissance-reproduction de chaque individu (la plus fréquente étant la mort).

De même, les lois thermodynamiques sont utilisées, sous le prétexte qu'elles s'appliquent à tout système (ouvert ou fermé), pour des "interprétations" scientistes parfois hautement mathématisées mais opportunistes, sur des agrégats biologiques n'ayant aucune connexité et aucune cohérence thermodynamique, mais ces agrégats sont cependant traités comme des systèmes (exemple : les individus d'un peuplement). Alors que l'essentiel des échanges thermodynamiques des systèmes écologiques est abiotique (même dans l'hémicycle suivant la photosynthèse, p. 175), les "systèmes écologiques" sont réduits aux seuls organismes (p. 164, 218). Cette "thermodynamique" floue sert aussi de cadre "théorique" pour le discours sur les efficacités des stratégies démographiques expliquant les distributions spécifiques (LABEYRIE, cité ci-dessus, et BLONDEL, 1987).

D'une façon plus générale, toutes les théories fondées sur des dénombrements d'individus susceptibles de se répartir de façon "équitable", "équilibrée" - en supposant chaque individu comme l'identique d'un autre, ce qu'il n'est jamais, dans une même écophase (variabilité génétique), dans une même espèce (diversité des écophases), dans un peuplement (différences entre espèces) - ne représentent pas les systèmes où ils s'inscrivent, ces systèmes n'étant pas, et de beaucoup, que biologiques.

On comprend dès lors que cette cumulation d'approximations, puis d'erreurs, conduisant à considérer qu'une somme d'individus constitue un système, puis identifiant les propriétés des individus à ce système (en parfaite confusion entre une hiérarchie cumulable et une hiérarchie systémique, p. 94), ne puisse conduire qu'à une accumulation de "théories" aussi spéculatives qu'irrationnelles et, qu'en définitive, celles-ci soient abandonnées tour à tour. Les "théories" sont initialement inadéquates à l'objet auquel on prétend les appliquer (= les écosystèmes) et, effectivement, ne se

"vérifient" que dans des domaines très étroits (par exemple d'individus peu dissemblables) ; elles n'aboutissent qu'à des discussions infinies.

Ceci ne serait pas grave si, au nom de ces "théories", maintes recherches prosaïques sur les faits écologiques n'étaient pas mésestimées et si la littérature bien pensante (au sens LABEYRIÉ, *op. cit.*) n'était pas envahie de ces démarches anti-scientifiques, non seulement inutiles mais nuisibles, car l'écologue a une responsabilité (c/. prologue de la 3ème partie, p. 467).

Pour constituer une écologie efficace, réellement opérationnelle, il n'y a pas lieu de rejeter aveuglément toutes ces réflexions spéculatives, mais de bien distinguer

- les explications opportunistes, qui peuvent être très pernicieuses, mais aussi comporter des hypothèses à terme opérationnelles,
- les heuristiques, qui peuvent n'être que des discours sur la nature, mais peuvent aussi constituer le cadre d'options opérationnelles.
- les options opérationnelles effectivement réfutables, face aux systèmes écologiques, par la globalyse.

A condition d'énoncer les limites effectives des théories (par exemple que tout individu *i* est considéré en première approximation comme analogue et que la "loi" ne s'applique que dans ces rares cas)..., toute expression théorique peut devenir fructueuse. Replacée dans son contexte écologique, une théorie devrait être limitée (c'est la portée d'une théorie) à son domaine. Par exemple, la signification d'une espèce (ou d'une écophase d'un taxon), en tant que bio-indicateur des systèmes où elle s'inscrit pourrait devenir explicite face à ces systèmes sur la base de mesures effectives (p. 495).

La plupart des liens et appréciations écologiques reste fort marquée par l'objectif "d'expliquer" en général la vie, ou en particulier l'adaptation de tel ou tel taxon, alors que la vie n'est qu'une particularité organisationnelle temporospatiale dans les écosystèmes (p. 75). Il y a opérationnellement nécessité d'affranchir tout à fait les études écologiques de ce biocentrisme pour permettre une observation sereine des systèmes écologiques tels qu'ils sont et pour une utilisation rationnelle des connaissances du domaine, tant fondamentales qu'appliquées..

3.6.3. Classements écobiotiques des organismes

1. Limites opérationnelles

Les êtres vivants actuels sont des sous-systèmes actuels inscrits dans les systèmes écologiques actuels.

Mais la diversité actuelle des formes vivantes, reflétant *ipso facto* la diversité des écosystèmes actuels où ils s'inscrivent, oblige à une mise en ordre, à une comparaison des similitudes et différences.

Elle conduit aussi, mais ceci devrait être clairement indépendant, à des supputations tendant à expliquer comment les caractéristiques écologiques et biologiques actuelles sont issues du passé. D'un point de vue opérationnel, cette approche évolutive souffre en effet d'une réfutabilité réduite (p. 180), alors que la démarche de validation sur l'actuel s'applique pleinement.

Car, comme tous systèmes, les organismes actuels reçoivent leurs caractéristiques de leur état antérieur, ou innés, et du milieu (exnéats), y compris du système socio-économique (actes) (p. 96).

1) Dès lors, la comparaison des organismes actuels conduit à des analogies apparentes, à tous les niveaux d'observation (chimique, biochimique, cellulaire, individuel), dont on peut tirer un classement biologique. Cela revient à considérer le référendaire-temps comme instantané, à utiliser les données acquises prises en

compte (référendaire composition) vis-à-vis de divers individus, nécessairement dispersés dans l'espace euclidien (référendaire espace).

2) Dès lors, une étude comparative peut être également conduite sur le milieu actuel des organismes, selon les mêmes modalités que celles décrites ci-dessus.

3) Mais les différences observées tendent à être interprétées par des "théories" écobologiques (dites souvent "écologiques"), supputant la signification adaptative de telle ou telle caractéristique retenue pour ces interprétations en considérant un doublet "caractéristique de l'individu—► caractéristique du milieu". Cela revient à prendre en compte selon le sens :

- la sélection du milieu sur la biocaractéristique,
- la signification adaptative de la biocaractéristique par rapport à une (des) mésocaractéristique(s).

En ce domaine interprétatif, les supputations souffrent toujours d'approches réductionnistes, car nous n'avons qu'une perception partielle (qu'une liste limitée) de mésocaractéristiques et biocaractéristiques (p. 237).

4) On peut enfin, tirant partie de la continuité vitale de tous les êtres vivants à partir de l'ancêtre commun, tendre à reconstituer la parenté des organismes qui, suivant des itinéraires différents, se sont adaptés à des milieux divers. C'est la phylogénèse sommairement abordée au paragraphe 3.6.4.

Pour résumer, il faut clairement comprendre que beaucoup d'interprétations tendent simultanément à atteindre les 3 premiers points, voire le 4ème. C'est-à-dire visent à résumer 1) le bioactuel, 2) le mésoactuel, 3) l'adaptation et 4) la phylogénèse.

Les diverses "classifications", les diverses "stratégies", les diverses "sélections" s'inscrivent souvent "entre" ces situations et si, par exemple, les auteurs dégagent une sub-théorie relative à la sélection adaptative (telle la sélection r ou K)..., les glissements conceptuels et sémantiques font divaguer les interprétations (PARRY, 1981 ; BARBAULT, 1987).

D'un point de vue opérationnel, on peut retenir ici

- 1) les caractéristiques des sous-systèmes biologiques actuels,
- 2) les caractéristiques mésologiques actuelles des systèmes écologiques incluant les organismes.

Ces deux approches pouvant être objectivées par un nombre croissant de données et les classifications biologiques ou mésologiques sur l'actuel (ou le quasi-actuel) sont opérationnelles et peuvent être enrichies, réfutées, critiquées, dans le Processus Répétitif d'Accroissement des Connaissances par comparaison typologique (p. 357, 367) ... (quasi-actuel — objectivement observable en temps réel),

3) les interprétations sur les valeurs adaptatives qui sont par contre souvent difficilement réfutables par les procédures énoncées au paragraphe 2.6.3.,

4) les interprétations phylogénétiques, portant sur des taxons et des échelles de temps mutuellement compatibles, qui peuvent, par approximations successives et en usant de prédictions-reconstitutions vérifiables par recoupements, rester dans une démarche rigoureuse (p. 180, 351).

Nous reprendrons donc dans ce paragraphe les seules interprétations sur l'actuel en écartant si possible les supputations. La phylogénèse étant traitée ultérieurement (p. 250).

Constater des similitudes, soit biologiques soit mésologiques, c'est tendre à se créer un ordre de référence, une simplification sur l'extraordinaire diversité des millions d'espèces vivantes dans les infinies modalités de leurs milieux ; c'est, transcendant les cas particuliers trop restrictifs, tendre à décrire dans un langage commun la co-adaptation de l'abios à la vie (et inversement), c'est-à-dire la cohérence des systèmes biophysicochimiques écologiques.

DECRI/INTERPRETE	PRINCIPE(S) THEORIQUE(S)	AUTEUR INITIAL OU/ET IMPORTANT
Distribution géographique des taxons	Géonémie ou chorologie	Opérationnel depuis le <i>Systema naturalis</i> , LINNE, 1758
Paléontologie évolutive Adaptation des organismes (invertébrés)	Evolutionnisme = transformisme Causes actuelles en Paléontologie-Géologie. Action du milieu sur les organismes. Généalogie des fossiles avec l'actuel	LAMARCK (de 1787 à 1822)
Morphologie fonctionnelle : relations organes/fonctions (vertébrés)	Organes homologues adaptés à des fonctions différentes. Unicité du plan de connexion des organes à tous stades	GEOFFROY ST HILAIRE (Etienne) (de 1797 à 1838)
Adaptation démographique aux ressources nutritionnelles (homme)	Croissance exponentielle et limites nutritionnelles supposées	MALTHUS (1804), VERHULST (1838) (p. 248)
Physionomie de la végétation	Allure des végétaux en fonction de la climato-topographie	HUMBOLDT (à partir de 1806)
Mécanisme d'adaptation des organismes	Importance parmi les actions du milieu des actes humains (élevages et cultures) et de la sélection naturelle	DARWIN (1859)
Liens végétation et mésologie	Adaptations des végétaux cohabitants aux facteurs locaux	WARMING (1895)
Types biologiques	Adaptations d'une caractéristique végétale (protection des méristèmes) à un facteur ¹ (la saison critique)	RAUNKIER (1905) (p. 244)
"Sélection" r et K	Adaptation démographique : un paramètre (fécondité) comparé entre taxons pour expliquer le milieu (contraintes, aléas)	MAC ARTHUR (1962) (p. 248)
Modalités adaptatives	Adaptation des végétaux à deux facteurs globaux (contraintes et aléas)	GRIME (1979)
Catégories écologiques	Caractéristiques morpho-fonctionnelles globales des individus (écophases) (multidimensionnelles) pour expliquer leur milieu multidimensionnel	BOUCHE (1971) (<:/>. p. 246) (fig. 3-2)

Tableau 3-2 - Relations organismes-milieu : interprétation et principes mis en oeuvre.

La littérature sur ce sujet est particulièrement abondante, en raison probablement de son importance essentielle aux yeux de l'écobiologiste, du naturaliste et de l'écologue, mais aussi en raison de la facilité avec laquelle il est possible de développer des digressions, ou de reporter des cas particuliers à ces grandes références.

Dans ce domaine difficile, les concepts se sont lentement dégagés et ont souvent été reformulés sans progrès réels, voire même, au nom d'une théorisation souhaitée, de façon abstraite, opportuniste ou/et non réfutable. Il y a donc lieu de bien distinguer les moyens mis en oeuvre (**tableau 3-2**) par une succession de chercheurs pour établir et dégager les relations des organismes à leur milieu.

D'un point de vue concret, nous retiendrons que ces classifications n'ont d'intérêt qu'à condition d'expliquer l'un à partir de l'autre et de ne pas perdre de vue le (ou les) critère(s) sur le(s)quel(s) sont fondées les classes. Les fréquentes "contradictions" découlent de l'oubli de ces conditions.

En l'état actuel, les classifications éco biologiques constatent les identités d'adaptation des organismes à des milieux identiques ou, réciproquement, dans des milieux identiques, des organismes généalogiquement éloignés convergent en ayant des caractéristiques adaptatives similaires.

Deux approches du problème ont cours. L'une donne la primauté au milieu et énumère, en fonction des milieux préalablement ordonnés, les caractéristiques biologiques dans ces milieux, ce sont les classements en types écologiques. L'autre donne la primauté à une ou plusieurs propriétés biologiques et, par rapport à celles-ci, classe les milieux : ce sont les catégories écologiques. En outre, des classements existent depuis des propriétés physiologiques établies au laboratoire, des suppositions sur les rôles (vicariance) et des propriétés démographiques. Une grande confusion existe entre ces classements et alimente des discussions souvent très académiques et spéculatives, ce qui est dommage.

2. La référence au milieu : les types biologiques

Le succès du concept de type biologique découle de la proposition de Raunkiaer (1905) de classer les plantes en fonction des contraintes climatiques. Dès le départ, la référence de ce concept est simple : climatique et, plus précisément, s'appuie sur deux caractéristiques mésologiques, les températures négatives et la sécheresse (= les contraintes climatiques essentielles, p. 204). Il s'agit d'apprécier les diverses caractéristiques végétales et plus simplement la protection des bourgeons à ces contraintes (tableau 3-3). Les aspects zoologiques abordés par GAMS (1918), devaient prendre de l'importance avec les propositions de KUEHNELT (1940) et REMANE (1943) et seront synthétisés par KUEHNELT (1965, 1970) qui insiste pour ne prendre en compte l'adéquation des organismes que par rapport à un seul "facteur" mésologique (= une caractéristique considérée comme essentielle). Dans ces classifications, ce sont les caractéristiques mésologiques qui servent de descripteurs expliquant les organismes.

Avec cette façon opérationnelle, car identifiable, KUEHNELT classe les animaux par rapport à diverses contraintes :

- physiques des habitats, physiques des ingestats, hydriques, respiratoires, thermiques, chimiques (pH, salinité) et qualité nutritionnelle.

Enfin Grime (1979) généralise l'approche de Raunkiaer pour expliquer les types adaptatifs des végétaux par rapport aux contraintes (= "stress"), agissant en permanence (et pas seulement en saison critique) sur les végétaux, et les perturbations (= "disturbance") détruisant tout ou partie de ceux-ci. Il aboutit à trois modalités adaptatives qu'il appelle, à la façon floue du concept, "stratégie", mais qui sont des types biologiques expliqués par le milieu (**tableau 3-4**). Les plantes sont classées en rudérales, résistantes et compétitrices. Les premières s'effacent devant les contraintes (par des dormances de graines) ; les secondes, de faible croissance, ont des propriétés diverses de résistance aux perturbations ; les troisièmes occupent

vigoureusement (et en intercompétition) les milieux favorables (p. 71). Ainsi SCEHOVIC (1988) montre, sur des espèces végétales fréquentes en prairie permanente, une corrélation négative entre la production de biomasse végétale et la concentration en "métabolites secondaires" dont le rôle dans l'organisme est défensif (toxicité, antibiotique, fongicide, goût et odeur répulsifs).

MAUVAISE SAISON	TYPES ECOLOGIQUES	LOCALISATION DU MERISTEME RESISTANT : HAUTEUR MINI (cm)	
Nulle jamais extrême	<u>Phanerophytes</u> (15 sous-types en fonction de la hauteur des méristèmes. Exemple : Megaphanerophytes, des feuilles caduques ou persistantes», des bourgeons couverts ou exposés et des tiges succulentes)	Megaphanérophytes	3000
		Mesophanérophytes	800
		Microphanérophytes	200
		Nanophanérophytes	25
Saison plus difficile sèche en région chaude ou froide	<u>Chamaephytes</u> (4 sous-types : suffrutescentes, couché passives ou active, en coussinet)		0
Neige	<u>Hemicryptophytes</u> (3 sous-types : proto-hemicryptophytes, en sub-rossette, en rosette)	raz du sol	
Ecart thermique importants neige	<u>Cryptophytes</u> (17 sous-types : géophytes à rhizomes, à tubercules, à racines charnues, à bulbes, radicigermes, héliophytes (des marais), hydrophytes (des cours d'eau))	enterré ou immergé	
Désert aride ou glacé	<u>Therophytes</u> (pas de sous-types)	grasses	

Tableau 3-3 - Les types écologiques de RAUNKIER (1905)

Il est opérationnellement possible d'interpréter en écobiologie, par rapport à une (ou quelques) caractéristique(s) du milieu, les traits morphologiques ou écophysiologiques des organismes. Mais probablement trop concrètes et prosaïques, ces interprétations n'ont pas fait l'objet, à ma connaissance, de développements numériques modernes. Cela serait possible (p. 378)

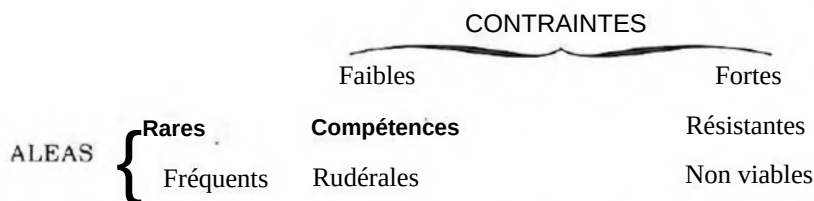


Tableau 3-4 - Modalités adaptatives ("stratégies") des végétaux en deux facteurs globaux : plantes compétitrices, résistantes et rudérales (d'après GRIME, 1979)

3. La référence biologique morphofonctionnelle : les catégories écologiques

Tout comme le concept de type biologique, celui de catégorie écologique s'est dégagé empiriquement avant de recevoir une formalisation. Par nécessité de complémentarité avec deux classements : le classement taxonomique (phylogénétique) qui n'a rien à voir avec le rôle actuel et le classement en types biologiques (*cf. ci-dessus*) des vers de terre par rapport à une caractéristique du milieu (en l'occurrence la stratification du sol : BALUEV, 1950 ; WIK'KE, 1953 ; LEE, 1959), j'ai été conduit à proposer, à partir de l'ensemble des caractéristiques accessibles sur les lombriciens une classification en catégories (BOUCHE, 1971).

Les caractéristiques biologiques intrinsèques servent de base à cette classification, pour diverses raisons opérationnelles simples : en tant que zoologiste du sol, j'avais aisément accès aux caractéristiques biologiques, alors que le sol opaque et très complexe (p. 143) était peu descriptible, surtout avec les moyens dont je disposais. Les caractéristiques prises en compte furent donc essentiellement morphologiques (taille, pigmentation, musculature, ...), physiologiques (intensité respiratoire, mode et choix alimentaires puis, en 1972, type de léthargie). Alors que l'information sur les caractéristiques du milieu, ayant une fonction sélective, est délicate à dégager, les caractéristiques morphofonctionnelles des lombriciens sont directement observables sur chaque individu (morphologie, certains traits physiologiques dont les choix alimentaires reflétés par l'endentère observable par dissection).

Cette approche empirique visant à distinguer, à partir des caractéristiques biologiques, les modalités des relations avec le milieu, fut précisée (BOUCHE, 1972, 1977) en soulignant le caractère relatif de ces catégories. A l'inverse des types écologiques, c'est à partir des caractéristiques biologiques ainsi classées qu'une déduction est ensuite faite sur l'ensemble des contraintes mésologiques (dans le cas des lombriciens : les classiques relations tropho-énergétiques s'observent surtout par les conséquences d'homochromie (prédations), la conformation intestinale et l'endentère (alimentation) et l'effet des prédateurs, des aléas climatiques, du froid et de la sécheresse sur les modalités de léthargie et les traits démographiques).

Toutefois, ce classement restait une interprétation essentiellement subjective. C'est fortuitement que le fondement objectif a été établi ; SIMS (1980), reprenant les caractéristiques morphologiques des lombriciens de France, que j'avais décrits, utilise une analyse multivariée à des fins de taxonomie phylogénétique.

J'avais écarté cet outil inadapté pour l'interprétation généalogique : le passé ne peut être directement déduit des caractéristiques actuelles ; mais les diagrammes présentés par SIMS montrent immédiatement l'importance d'un tel outil pour interpréter les convergences fonctionnelles actuelles fondées sur les caractéristiques morphologiques actuelles (BOUCHE, 1980) (fig. 3-2).

Ainsi, l'analyse multivariée, conduite de façon neutre sur l'ensemble des caractéristiques morphologiques, validait le classement en catégories et soulignait par ses nuances l'existence d'intermédiaires, opérationnellement on peut calculer une proximité morphofonctionnelle entre lombriciens et, réciproquement, interpoler les résultats entre les lombriciens dont les "distances" adaptatives sont ainsi évaluées (p. 374).

Remarquons que ce qui s'est fait pour ce groupe animal pourrait se pratiquer sur tout groupe biologique (indépendamment si possible des hiérarchies cumulables taxonomiques) et que ces mêmes analyses pourraient permettre de tester ultérieurement les distances entre habitats.

4. Classement physiologique : groupes fonctionnels

Recherchant une approche de la microbiologie écologique, WINOGRADSKY (1945, *in* WINOGRADSKY, 1949) dégage - par opposition avec les cultures de souches microbiennes pures - les "cultures spontanées" fondées sur le repiquage d'< **organismes directement depuis le milieu naturel à un état ne nécessitant plus**

aucune épuration préliminaire, quand il s'agit d'expériences destinées à l'étude de leur activité spécifique : Nitrification, Fixation, etc.>>. POCHON et DE BARJAC (1958)-poursuivant dans la même veine - définissent les groupements physiologiques (ou groupes fonctionnels) mis en évidence techniquement de la manière suivante : <<Le principe de base est toujours le même : mettre un groupement microbien physiologique, au sein de la microflore totale, dans des conditions telles que son activité soit électivement stimulée et puisse être quantitativement appréciée. >>

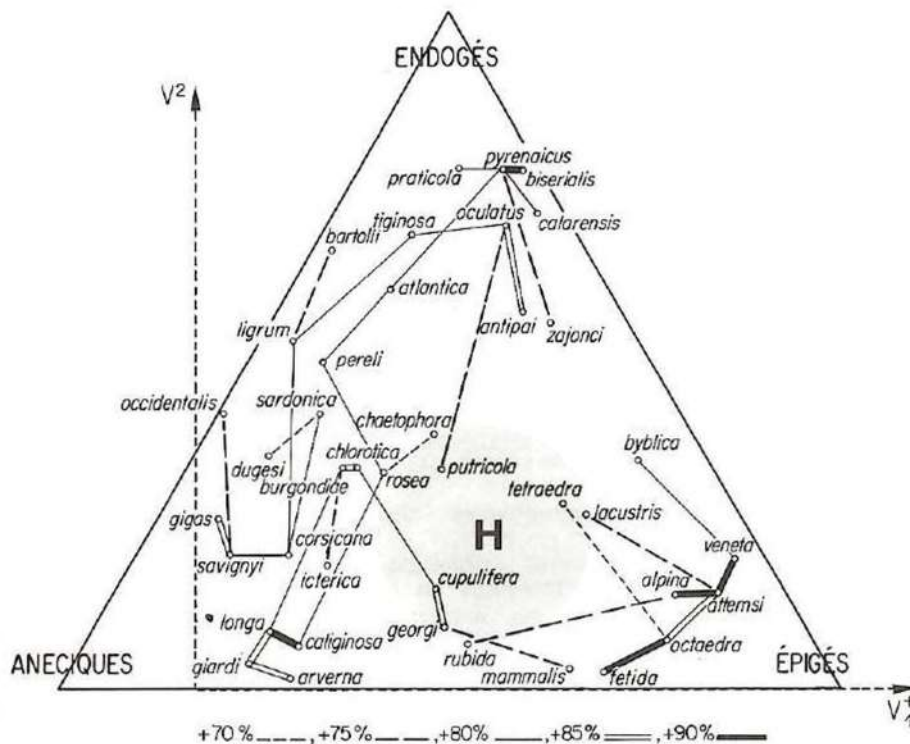


Figure 3-2 - Calcul des distances entre espèces lombriciennes à partir de leurs caractéristiques morphologiques par Analyse des Coordonnées Principales (GOWER, 1966) par SIMS (1980) sur les données de BOUCHE (1972). Relations avec les catégories écologiques (BOUCHE, 1971, 1980c) : épigés, anéciques et endogés et le quatrième facteur : VhydropHilie (H).

Ainsi les groupes fonctionnels sont fondés - non plus sur la morphologie, accessoirement la physiologie - versus le système écologique réel pour fonder des catégories écologiques - non plus sur les facteurs mésologiques supposés essentiels pour sélectionner des types biologiques, mais sur une sélection en microcosmes conçus pour électivement ne retenir que certaines potentialités physiologiques. En microbiologie, l'existence de germes ayant l'aptitude d'effectuer des fonctions n'est pas sans rapport avec la réalité des fonctions ; toutefois un dénombrement de la microflore ou de tout autre organisme, potentiellement capable d'une fonction, n'est pas nécessairement proportionnel avec l'intensité écophysiologique effective de cette fonction.

5. Supputations sur les rôles : vicariances

Des organismes appartenant à des lignées parfois très différentes convergent pour, semble-t-il, effectuer les mêmes fonctions. Qualitativement il est tentant de résumer des analogies fonctionnelles. Opérationnellement pour fonder objectivement ces hypothèses de similitude il faudrait être capable de préciser la nature de ces fonctions et de les mesurer pour établir une distance de similitude fonctionnelle. Nous verrons (p. 358) qu'une telle exigence est en pratique utopique car l'approche fonctionnelle relève du Processus Répétitif d'Accroissement des Connaissances systémique allant essentiellement du particulier (donc d'un choix limité de fonction(s)) au général. Autant les catégories écologiques par leur objectivité morphologique, voire physiologique, se prêtent à une classification multivariée, autant les analogies fonctionnelles multicritères ne sont que des allégories didactiques. La transposition des concepts d'épigés, anéciques et endogés, effectuée par ANDERSON et INGRAN (1989) à des "groupes fonctionnels", généralisables à l'ensemble de la faune du sol, gagne en images didactiques mais perd tout fondement objectif réfutable : c'est confondre l'objet avec l'approximation subjective de son rôle. Pour distinguer l'objectif du supputé, je propose de dénommer ces "groupes" supposant des identités fonctionnelles par le préfixe erg (= fonction, rôle, énergie, travail) donc ici pour l'allégorie sur la faune du sol : ergépigés, erganéciques, ergendogés pour la faune supposée ayant un rôle global semblable à celui des épigés, anéciques et endogés.

Le terme de "groupe fonctionnel" employé ici est par ailleurs impropre car ce concept a reçu antérieurement une base plus objective avec la notion développée en microbiologie à partir de cultures électives, décrite ci-dessus en 4). Des supputations sur l'identité fonctionnelle sont des vicariances. 11 faut donc dénommer ces groupes vicariants car ayant un rôle supposé substituable.

6. Les considérations démographiques : sélection et stratégies

Des tentatives de classement écobioécologique, à partir de bases théoriques appuyées sur des études de potentialités ou des formalisations démographiques classiques, se sont multipliées ces dernières années, au point de devenir classiquement exposées dans les ouvrages d'écologie.

Si Malthus (1804) avait souligné les limites d'un habitat quant au nombre d'habitants, VERHULST (1838) en avait déduit la courbe théorique d'ajustement du niveau de cette population, puis WALLACE et DARWIN les conséquences sélectives. Mac Arthur (1962) devait souligner que les modalités de sélection naturelle avaient des conséquences adaptatives : certains organismes (r-sélectionnés) pullulent dans un milieu à faible compétition (à la suite d'aléas), tandis que d'autres ont une démographie modeste (K-sélectionnés), s'ajustant à un milieu surpeuplé (fig. 2-22, p. 178). Ce que VERHULST avait décrit au sujet des potentialités d'une population au cours du temps (les hommes du royaume de Belgique), MAC ARTHUR l'applique aux potentialités adaptatives démographiques de diverses populations comparées. Notons qu'à ce stade, la "sélection" est synonyme de type écologique par sa relation monofactorielle démographie/aléas : il s'agit de types écologiques démographiques. Pour Malthus et VERHULST il s'agit essentiellement de la prolificité face aux possibilités nutritionnelles dans le rapport nourriture/population. A cette prolificité relative ont été associées de nombreuses autres caractéristiques biologiques (telle la taille, les plus grosses espèces étant généralement K sélectionnées car adultes plus tardivement, etc.), de sorte qu'à la nature de la sélection (action du milieu) s'est substituée la nature de l'adaptation (propriétés biologiques), en termes de stratégie adaptative dans un cadre plus général. En fait, les spéculations évolutionnistes (temporelles) et les constats spatiaux (notamment la biogéographie insulaire, Mac Arthur et WILSON, 1967) sont très vite venus compléter une littérature (surtout zoologique) très abondante sur ce sujet, la signification des concepts devenant extrêmement floue et le même terme désignant des démarches très différentes.

11 est en effet commode d'apprécier qualitativement la prolificité relative et de considérer les différentes influences supposées des caractéristiques du milieu sur celle-ci. Ces supputations se heurtent à de grandes difficultés opérationnelles lorsqu'on veut mesurer effectivement à la fois les aptitudes démographiques et les contraintes mésologiques jouant un rôle démographique (BLONDEL, 1979). Ceci doit être assuré en outre 1°) dans l'espace, ces recherches étant souvent conduites sur des animaux mobiles, et 2°) dans une période de temps pouvant apporter une preuve suffisante pour valider les hypothèses sous-jacentes à ces hypothèses.

L'interprétation démographique de l'espèce tient compte de l'effet des conditions difficiles (A-sélection) (Green-Slade, 1972, 1982 ; SOUTH WOOD, 1977) et des écophases (GRIME, 1979), c'est-à-dire redécouvre ce qui est bien connu depuis GRANDJEAN (1947a et b) (p. 213).

Cette approche, initialement précise, de la proliféité relative fut étendue ; sa généralisation aux stratégies adaptatives fut saluée comme <<l'un des paradigmes majeurs de l'Ecologie théorique>> (BARBAULT et al., 1980)... ; elle devint par moi extension, la prise en compte temporospatiale des sous-systèmes biologiques.

L'extension conceptuelle s'est accompagnée d'un relâchement de l'objectivité. 11 est rare de disposer de données démographiques permettant *in situ* d'effectuer la comparaison de la proliféité relative et encore plus rare d'avoir une intégration mésologique permettant leur interprétation réfutable. Plus commodément on a admis que des critères non démographiques (telle la taille) pouvait s'y substituer puis des propriétés observées ou supputées ont été rapportées à ces suppositions - que les taux de ponte, de croissance, souvent observés en microcosmes (conditions de laboratoire, d'élevage ou de culture) pouvaient s'appliquer au champ écologique -. La rareté et la fréquence en un lieu de taxons ont été comparés à l'opinion hypothétique que nous avions des relations taxon/milieu, etc. ce qui n'a rien à voir avec une aptitude relative à la proliféité. L'objectivité de la démographie effective pouvait seule fonder le constat initial des modalités sélectives agissant sur la démographie réalisée. Cette démographie est très généralement inaccessible : elle est très rarement connue et mesurable et interprétée de façon réfutable en termes de proliféité relative dans le champ écologique.

Après un effet de mode, conduisant à de nombreuses publications se référant à cette terminologie, mais avec une extension conceptuelle considérable permettant d'à peu près tout dire, une réaction se dessine aujourd'hui pour décanter cette pratique "théorique" multiforme mais en définitive informelle et peu opérationnelle.

Stimulantes pour la pensée, les sélections *r* et *K* n'ont qu'une dimension opérationnelle restreinte, voire quasi nulle, en raison même de leur origine spéculative. << **Despite the many field studies in which *r*- and *K*-selection have been implicated, there do not appear to have been any studies in which the selection pressure responsible for the observed life-history characteristics can be unequivocally attributed to the amount of crowding. While the amount of crowding clearly constitutes an important selection pressure within a population its importance relative to other pressures still needs to be established.**

It is now apparent that there are many dimensions to a life-history pattern in addition to *r*- and *K*-selection (MAC ARTHUR, 1972 ; WILBUR et al., 1974). Life-histories are shaped by constraints imposed by seasonality (Boyce, 1979), habitat stability (SOUTHWOOD et al., 1974 ; WHITTAKER and GOODMAN, 1979), the need for dispersal (HORN, 1978) in addition to predation (WILBUR et al., 1974), severe climatic stresses (SCHAFFER and GADGIL, 1975 ; GRIME, 1979) and probably other factors. Recognition of the complex tradeoffs which determine life-history patterns is more likely to provide insight than attempts to fit these patterns into a "simple" but ill-defined concept.>> PARRY, 1981. C'est rappeler les contraintes adaptatives des individus et populations (cf. paragraphes précédents) (fig. 3-1, p. 226) et finalement glosser sans signification précise (BARBAULT, 1987).

Cela n'implique pas que toutes ces démarches spéculatives étiquetées "stratégie" soient sans portée interprétative, surtout si l'on revient aux faits du champ écologique, comme l'a amorcé Grime (1979) en dégagant d'une façon globale les "stratégies adaptatives" des plantes qu'il vaudrait mieux, plus modestement et sans co-notation, appeler "modalités adaptatives" (p. 244).

A cette époque, cette approche remarquablement synthétique ne pouvait que procéder par comparaisons. Nul doute qu'une écologie pleinement opérationnelle, traitant directement les données mésologiques (c'est-à-dire l'échantillon du système écologique) et les caractéristiques des organismes (échantillonnées sur ces organismes), permettra de décrire les connexions effectives des sous-systèmes biologiques avec leur système écologique. Cela peut se faire en éclairant alternativement la typologie des milieux des organismes (p. 378) ou les catégories d'organismes par rapport à leur milieu au moins dans l'actuel, voire dans un essai d'histoire naturelle plus difficile à décrire et tester (p. 180). Une terminologie relative aux adaptations sous contraintes mésologiques (= types écologiques) ou aux convergences morphofonctionnelles (= catégories écologiques) peut constituer un langage d'expert utile pour situer en première approximation ces groupements. En écologie opérationnelle (p. 421) les manipulations de données objectives établies sur les systèmes écologiques permettent heureusement de s'affranchir des supputations spéculatives théoriques évoquées par Parry (op. cit.)

3.6.4. Classements taxonomiques et phylogénèse

1. Importance et complexité de la classification biologique

Il y a peut-être dix millions d'espèces vivantes aujourd'hui sur le globe ; une fraction, de l'ordre de 3 à 4 millions, est décrite, c'est-à-dire connue de la science.

Ces descriptions sont de qualité et de signification très inégales. Il y a lieu sur ce point d'être très clair car l'utilité écologique de l'identification d'un individu à une espèce (littéralement cet individu est identique à la référence de l'espèce) est souvent très mal perçue, donc mal utilisée par les écologues.

Il y a lieu de distinguer également entre taxonomie et systématique. La taxonomie distingue les taxons ; les taxons, étant les unités utilisées en taxonomie et systématique, s'ordonnent selon une nomenclature que nous énonçons ci-dessous. La systématique est l'art d'organiser les taxons selon une hiérarchie cumulée, non systémique (p. 94). Attention, la systématique est non systémique !

Systématique et taxonomie sont étroitement liées, mais évidemment distinctes dans leur logique. Un taxonomiste peut apporter la preuve de l'existence d'un taxon... et mal le classer dans un taxon hiérarchiquement supérieur : un taxonomiste est nécessairement un systématicien, parfois malgré lui.

Les études des systèmes biophysicochimiques de l'écologie font nécessairement référence aux organismes (p. 20). L'écologue se doit donc de rapporter les composants biologiques des systèmes qu'il étudie aussi efficacement, donc correctement, que possible. D'une façon générale on mesure mal la difficulté d'élaboration et la fragilité conceptuelle des taxons.

2. Hiérarchies descendantes : de LINNÉ à SIMPSON

Dès les aurores de la science moderne, les naturalistes ont été confrontés à l'extraordinaire diversité et au nombre des individus vivants. La première chose était de les reconnaître, de les distinguer, bref de les classer, puis de les identifier à ces classes ou taxons. Cette tendance primaire domine toujours dans un premier temps l'organisation des connaissances. Elle a permis d'adopter une normalisation internationale de nomenclatures, indispensable à l'écologie et découlant directement des propositions de CAROLUS LINNAEUS (1758). Ces normes créent une hiérarchie cumulée commode. Il s'agit, par des critères simples, de séparer l'ensemble des organismes en sous-ensembles, et ces sous-ensembles en unités plus fines.

Généralement, les coupures adoptées par les systématiciens sont, par commodité, organisées de façon dichotomiques (rarement tri- ou tétra-tomiques). Ce qui n'est pas monocellulaire (protiste) est pluricellulaire ; ce qui n'est pas parmi les pluricellulaires plantes est animal ; ce qui, parmi les animaux, est diploblastique n'est pas Lriploblastique ; ce qui dans les triploblastiques n'est pas vertébrés, est invertébrés, ...

Ces coupures hiérarchisées sont organisées en taxons <<**Un taxon est un groupe d'organismes reconnus en tant qu'unité formelle à chacun des niveau d'une classification hiérarchique**>>. Les plus généraux sont ceux des organismes subdivisés classiquement en deux, puis trois règnes (aujourd'hui cinq règnes, p. 189), les monomères, protoctistes, champignons, plantes et animaux, eux-mêmes divisés en phylums (arthropodes, vertébrés, nématodes, mollusques, etc... parmi les animaux) subdivisés en classes (tels les insectes), eux-mêmes en ordres (tels les Coléoptères) subdivisés en familles (tels les Coccinellidae) regroupant des genres tels les coccinelles (*Coccinella*) dont l'espèce coccinelle à 7 points (*Coecinnella septempunctata*). Cette démarche, parlant du général vers le particulier par hiérarchie descendante, est primaire et indispensable. Elle vise l'efficacité, la commodité, la clarté avant tout ; elle s'appuie sur (et se confond souvent avec) des techniques de tri s'appuyant sur des caractéristiques choisies en fonction de leur efficacité (commodité d'observation et constance dans les organismes : clés dichotomiques). Elle permet de s'y retrouver ; elle est l'indispensable étape de toute recherche biologique et écobioologique. Elle domine encore largement la taxonomie de nombreux groupes d'organismes où il y a superposition entre clé dichotomique (ou classement automatique) et taxons - ces derniers étant définis en fonction de leur position par rapport aux critères d'observation commodes retenus, pour séparer en sous-ensembles un ensemble plus général. A l'origine ce <<*Syslema naturalis*>> (LINNAEUS, 1758) pouvait se conforter sur l'idée répandue que les organismes, créés sur un modèle standard voulu par Dieu, se reproduisaient identiques à travers les générations. Ensuite sa commodité a permis une certaine efficacité opérationnelle de la taxonomie par hiérarchie descendante. Dans ces conditions, les organisations en groupes hiérarchisés relèvent du flair du taxonomiste, de l'art (SIMPSON, 1961) et en conséquence, les taxons créés sont avant tout des commodités qui échappent, par leur absence de fondement théorique, à toute critique scientifique (= réfutation de leur validité).

3. Hiérarchie ascendante : de Lamack à HENNIG

Ce travail de classement était *a priori* effectué pour permettre de retrouver les êtres vivants identiques à ceux déjà connus (= identification). C'est-à-dire à les identifier à un taxon pré-établi. Dans un second temps, il a conduit à se poser la question de la signification des taxons ainsi créés. Y-a-t-il des propriétés communes, autres qu'arbitraires, à leur commodité dichotomique ? (et à la volonté de Dieu ?).

LAMACK, dès 1794, remet en cause les classes de LINNAEUS - notamment en ré-interprétant les deux classes : *Insecta* (= Arthropodes) et *Vermes* (invertébrés à corps mous plus ou moins vermiformes). Cette mise en ordre, jamais effectuée précédemment, de l'ensemble des animaux, admet explicitement la transformation des animaux sous l'action du milieu, ou plus exactement en même temps que l'évolution de ce milieu. Cette notion d'évolution sera développée dans sa philosophie zoologique (1809). Il y a dans celle-ci une extraordinaire superposition des cycles vie-mort, que nous savons aujourd'hui très courts comparativement au temps évolutif (que nous savons comparativement très long, ... quelques centaines ou millions d'années, ce qu'exceptionnellement LAMACK admettait déjà). Les naturalistes de cette époque (et antérieurement) étaient en effet frappés par la rapidité du développement vital "à partir d'une matière organique morte", de sa réorganisation en animacules, en vers, en insectes. L'apparente génération spontanée dans le cycle d'une saison permettait de voir l'évolution des matières putrides en un insecte... organisme encore "imparfait", mais dont on pouvait voir que l'évolution un peu prolongée aboutirait à une forme beaucoup plus "parfaite". Buffon n'écrit-il pas <<Tous les animaux se

nourrissent de végétaux ou d'autres animaux, qui se nourrissent eux-mêmes de végétaux. Il y a donc dans la Nature une matière commune aux uns et aux autres qui sert, à la nutrition et au développement de tout ce qui vit ou végète : cette matière ne peut opérer la nutrition et le développement qu'en s'assimilant à chaque partie du corps de l'animal ou du végétal, et en pénétrant intimement la forme de ces parties, que j'ai appelée le moule intérieur. > >...<<11 n'y a donc point de germes préexistants, point de germes contenus à l'infini les uns dans les autres ; mais il y a une matière organique toujours active, toujours prête à se mouler, à s'assimiler et à produire des êtres semblables à ceux qui la reçoivent. Les espèces d'animaux ou de végétaux ne peuvent donc jamais s'épuiser d'elles-mêmes ; tant qu'il subsistera des individus, l'espèce sera toujours toute neuve ; elle l'est autant aujourd'hui quelle l'étoit il y a trois mille ans ; toutes subsisteront d'elles-mêmes tant qu'elles ne seront pas anéanties par la volonté du Créateur. Au «Jardin du Roi le 27 mai 1748>> (BÜFFON, Histoire naturelle, Des animaux, 1749).

Dans ce contexte intellectuel, il s'agit ici de substituer, au classement commode pour ses coupures, un classement traduisant le degré de similarité dans une échelle d'organisation où la génération spontanée réorganise les matières organiques (p. 79) : il y a des degrés vers des formes plus parfaites d'organismes.

Ces idées d'organisation ascendante (ou descendante depuis l'homme) fondent le transformisme de LAMARCK (= évolutionnisme) sur des bases paléontologiques qui lui permettent d'envisager les phénomènes dans des échelles de temps exprimées en centaines de millions d'années (LAMARCK, 1802) : <<pour la Nature, le tems n'est rien, et n'est jamais une difficulté ; elle l'a toujours à sa disposition, et c'est pour elle un moyen sans bornes>>. Ces idées, partagées par certains de ses contemporains, ont marqué les recherches de ses successeurs (E. GEOFFROY St HILAIRE et les "plans d'organisation", LYELL et la géologie "moderne", enfin WALLACE et DARWIN et l'adaptation par la sélection).

<<Les divisions systématiques, classes, ordres, familles, genres et espèces, ainsi que leurs dénominations, sont une oeuvre purement artificielle de l'homme. Les espèces ne sont pas toutes contemporaines ; elles sont descendues les unes des autres, et ne possèdent qu'une fixité relative et temporaire : les variétés engendrent des espèces. La diversité des conditions de la vie influe, en les modifiant sur l'organisation, la forme générale, les organes de l'animal ; on en peut dire autant de l'usage ou du défaut d'usage des organes. Tout d'abord, les animaux et les plantes les plus simples ont seuls été produits, puis les êtres doués d'une organisation plus complexe. L'évolution géologique du globe et son peuplement organique ont eu lieu d'une manière continue et n'ont pas été interrompus par des révolutions violentes. La vie n'est qu'un phénomène physique. Tous les phénomènes vitaux sont dus à des causes mécaniques, soit physiques, soit chimiques, ayant leur raison d'être dans la constitution de la matière organique. Les animaux et les plantes les plus rudimentaires, placés au plus bas degré de l'échelle organique, sont nés et naissent encore aujourd'hui par génération spontanée. Tous les corps vivants ou organismes de la nature sont soumis aux mêmes lois que les corps privés de vie ou inorganiques. Les idées et les autres manifestations de l'esprit sont de simples phénomènes de mouvement qui se produisent dans le système nerveux central. En réalité, la volonté n'est jamais libre. La raison n'est qu'un plus haut degré de développement et de comparaison des jugements. > > (LAMARCK, 1815).

Cette remarquable proposition (conçue à partir de 1794), si elle comporte quelques imprécisions archaïques (usage ou défaut d'usage, génération spontanée pour les groupes peu observables), est si en avance sur son temps que l'évolution "organique" est d'emblée placée dans son contexte écosystémique (p. 177). L'évolution biologique n'est pas dissociée, à la différence de bien des études écobioologiques ultérieures, de l'évolution physique générale qui inclut les modalités particulières des êtres vivants comme sous-système de l'évolution géologique. Aucune référence à des "forces vitales", "pressions de sélection", "orthogenèse" ou propriétés spécifiquement non physiques ou téléologiques, n'est évoquée : seuls des mécanismes, dont certains

ont été précisés ou largement rejetés, sont proposés de façon scientifiquement réfutable (au début du XIX^{ème} siècle !) dans le cadre d'une oeuvre considérable.

Remarquons que si LAMARCK recherche et propose d'emblée une hiérarchisation évolutive dans un transformisme général, Darwin, subséquemment et logiquement, s'intéresse au niveau fin de l'espèce et à sa (trans)formation (= spéciation), notamment par sélection naturelle. Les espèces dérivant les unes des autres, les classifications devaient devenir des généalogies. A la suite de LAMARCK et sous l'influence notamment de Ernst HAECKEL, les théories généalogiques firent leur apparition et les classements furent souvent considérés sous l'angle phylogénique. Alors les coupures hiérarchiques acquièrent d'abord une signification transformiste ; elles tendent à regrouper, à chaque niveau supraspécifique, un ensemble d'individus découlant d'une espèce hypothétique commune ancestrale.

Or il est plus facile de dégager des parentés lorsque les espèces sont très voisines ou en cours de "séparation" et beaucoup plus difficile (voire arbitraire) d'attribuer à des caractéristiques une signification historique. Les taxonomistes pris entre la nécessité de classer (il est impossible notamment, pour des raisons de règle de nomenclature de décrire une nouvelle espèce, sur laquelle on sait évidemment peu de chose, sans l'attribuer à un genre, c'est-à-dire sans la classer 1) et le désir d'une compréhension phylogénique, ont souvent pratiqué un compromis, très délicat et peu scientifique, entre des opinions non contrôlables sur la généalogie des taxons et les classements arbitraires.

Toutefois, les disciplines les plus avancées de la biologie permettent et obligent à une méthodologie plus rigoureuse, lentement dégagée et récemment formalisée par l'entomologiste diptérologue W. HENNIG (1950) dans un ouvrage resté confiné à sa spécialité. Cela jusqu'au moment où cette rationalisation fut placée au centre d'une remise en cause du classement des Vertébrés, groupe où les spécialistes sont assez nombreux pour avoir dépassé le stade des inventaires et où la hiérarchie descendante est clairement insuffisante.

Cette méthode (= cladisme) donne logiquement primauté aux caractéristiques tardives, communes seulement entre espèces actuelles ou récentes, et après élimination des caractéristiques de convergence. Il s'agit de caractéristiques apomorphiques permettant la constitution d'un taxon monophylétique. Puis par hiérarchies ascendantes (dans les taxons et dans le temps) des caractéristiques plus anciennes sont prises en compte... Elle s'écarte des interprétations donnant primauté aux caractéristiques jugées anciennes (primitives) dites pléisiomorphies qui sont dans l'autre méthode la base de hiérarchies descendantes où ces caractères se retrouvent conservés dans différents taxons subalternes regroupés en ensembles paraphylétiques arbitraires. Le cladisme a l'avantage d'ordonner chronologiquement du présent vers le passé mais n'écarte aucune des difficultés d'interprétation entre les convergences et apomorphies vraies et, chez les organismes sans fossiles, ou de jugements sur la pléisiomorphie ou apomorphie des caractéristiques.

Le cladisme donne primauté aux caractéristiques jugées comme apomorphes et permet des classifications temporaires, explicites, susceptibles de remise en cause car dépendantes des interprétations et réfutations comme dans toute démarche scientifique. La hiérarchie, qui découle secondairement de l'interprétation, est ascendante et est d'autant plus certaine qu'elle s'appuie sur une étude détaillée. Il est à noter que la démarche formalisée par HENNIG, s'applique à toute information ayant trait aux organismes : biochimique, structurelle, morphologique, voire physiologique.

4. (Controverse et pratique de la taxonomie

Dans la pratique, l'écologue doit donc s'appuyer sur une étude taxonomique qui, quelles que soient son élaboration et sa fiabilité intrinsèque, lui fournira les moyens d'une analyse plus ou moins poussée du matériel biologique. La taxonomie ne peut se présenter comme un savoir acquis mais tout au plus comme un moyen d'approximation, d'autant plus fragile que la réfutabilité des études évolutionnistes,

qui la sous-tendent, est toujours délicate (p. 180). En fait, on devrait la considérer pour ce qu'elle est : un Processus Répétitif d'Accroissement des Connaissances par comparaison typologique (p. 357).

Les controverses taxonomiques sont en fait restreintes aux seuls domaines où il y a assez de taxonomistes pour controversée - ce qui ne concerne que quelques pourcents des organismes observables en écologie. Mais, même sans controverse, le simple progrès des connaissances oblige à une fréquente remise à jour des classements et, corrélativement, des dénominations, ce qui ne va pas sans inconvénients.

D'une façon générale, la taxonomie tend à devenir phylogénique, c'est-à-dire qu'elle n'a pas pour objectif de regrouper des organismes ayant même fonction, mais ayant même parenté. Pour cette raison, les taxons ont écologiquement d'autant moins de sens qu'ils sont élevés dans la hiérarchie taxonomique. Inversement, des espèces ou variétés, phylogéniquement lointaines peuvent converger pour occuper des fonctions voisines : la catégorie écologique ne doit pas être confondue avec la position taxonomique (p. 245). D'un point de vue pratique, pour l'acquisition de l'information, il y a lieu d'adopter l'analyse la plus fine réalisable et secondairement, à l'interprétation, de choisir la nomenclature la plus pertinente. Le Processus Répétitif d'Accroissement des Connaissances par comparaison typologique (p. 357) peut s'appliquer par taxinomie automatique aux catégories écologiques et en taxonomie cladistique si les opinions d'experts relatives à l'apomorphie sont explicitées.

5. La notion d'espèce et ses limites

Fondamentalement, une espèce regroupe l'ensemble des individus qui, dans la biosphère, échangent des gènes entre eux. C'est par exemple, le cas de toutes races, variétés et variantes de l'espèce humaine dont on sait qu'elles sont susceptibles de se croiser au moins de proche en proche. Cette définition est claire et constitue la seule référence solide à un taxon ; tous les autres taxons sont :

1) soit des subdivisions de l'espèce, plus ou moins arbitraires, dans le continuum des variantes ; elles sont choisies pour tenir compte des variations remarquables : taxonomie infraspécifique (p. 258),

2) soit des regroupements d'espèces en ensemble d'espèces apparemment assez semblables, puis le regroupement de ces ensembles de premier niveau en ensembles plus vastes : taxonomie supraspécifique (p. 259).

Toutefois, la mise en oeuvre pratique de la définition de l'espèce est très loin d'être simple. La découverte d'une espèce nouvelle pour la science est journalière ; elle est très fréquente dans les groupes peu étudiés et ceci de façons différentes :

a) par l'étude de nouveaux matériels biologiques... et il n'est pas nécessaire d'aller bien loin, même dans la vieille Europe, foyer de la taxonomie, et dans des lieux banaux : e.g. l'étude de certains groupes d'animaux du sol n'en est qu'à ses débuts ;

b) par la meilleure connaissance des êtres vivants révélant très souvent des confusions : la même "espèce" contenant en fait des espèces bien distinctes préalablement confondues ;

c) dans les groupes très étudiés, c'est l'inverse, la meilleure connaissance révèle l'abus des subdivisions "spécifiques".

Mais, au stade a) surtout, l'espèce est largement arbitraire. Il s'agit de la prise de contact avec une population (voire un individu), considérée comme suffisamment dissemblable des autres organismes du même groupe pour être classée *a priori* comme une "bonne espèce". Cette appréciation empirique, variant d'un chercheur à l'autre, devrait être considérée comme une supposition... mais elle est présentée, par nombre de taxonomistes, comme un fait établi. L'écologue devra donc à la fois s'appuyer sur les travaux taxonomiques et considérer en général les espèces comme des suppositions plus ou moins probables.

Le taxonomiste est en effet confronté à un problème difficile. Ne pas distinguer un taxon, c'est s'interdire d'en connaître la validité, le distinguer inutilement, c'est encombrer la littérature de dénominations invalidées.

En fait, tout dépend de la qualité et des modalités d'étude du matériel étudié. Par exemple, les arthropodes possèdent généralement un très grand nombre de caractéristiques facilement accessibles, souvent quantitatives, qui ne sont en pratique que partiellement utilisées. Dans les cas difficiles, il y a toujours possibilité d'accroître le nombre de caractéristiques étudiées.

A l'inverse des groupes entiers ne portent que peu de caractéristiques morphologiques. Ainsi les lombriciens, par leur mode de vie même, présentent peu de diversité morphologique et classiquement le peu de caractéristiques utilisables conduit à un nombre restreint d'espèces apparentes. Les écologues travaillant sur de tels groupes sont alors souvent en présence de situations impossibles. Ainsi EVANS (1946) est-il conduit à distinguer deux espèces là où "les auteurs" n'en voyaient qu'une. Il y avait en effet dans la placette qu'il étudiait deux populations ayant clairement deux rôles écologiques distincts, mais dont la morphologie diffère peu, si ce n'est la taille et la pigmentation. Ce dernier caractère est d'ailleurs considéré comme non valide car... il disparaît dans l'alcool des musées ! Non seulement il y a peu de caractéristiques mais certaines sont marquées d'ostracisme. Ce qui conduit nombre de taxonomistes à refuser cette distinction, pourtant évidente localement.

Autre exemple, en écrivant une faune de France (BOUCHE, 1972), je ne pouvais ignorer le travail d'ANDRE (1962) qui, par un croisement très attentif de deux souches d'*Eisema* reconnaissables à leur pigmentation, a démontré la stérilité de leur descendance. Le travail de DEVRIES (1968) renforce ce constat en montrant que dès l'embryogenèse ces animaux sont distincts. Je crée en conséquence pour *Eisenia fetida andrei*. Bouché 1972, un statut subsppécifique qui ménage prudemment les susceptibilités (car il s'agit d'une pigmentation labile dans les solutions de formol et d'alcool de musées 1), tout en jugeant qu'«il s'agit très vraisemblablement d'une bonne espèce» >. Dix ans se passeront sans que ce matériel, pourtant le plus courant en laboratoire, soit correctement identifié, jusqu'à la "redécouverte" par JAENICKE en 1982 < <*Eisenia foetida* is two species !> > au cours d'une belle étude comparant les iso-enzymes par électrophorèse et confirmant cette distinction. Depuis ROBOTTI (1983) a présenté les mêmes conclusions, ce qui n'empêche pas une liste, présentée comme une mise au point, de remettre les deux espèces en synonymie, sans justification aucune (EASTON, 1983), si ce n'est l'impossibilité après fixation de distinguer morphologiquement les deux espèces sur les critères habituels ! (SIMS, 1983). Il s'agit en fait du cas exceptionnellement bien étudié dans un groupe où, en raison de la faiblesse des études, l'usage d'arbitraires règne en maître. Ce cas peut révéler que nombre des espèces de ce groupe sont peut-être plurispécifiques ! (BOUCHE *et al.*, 1988b).

En fait, l'état des connaissances scientifiques actuelles reflètent l'existence passée et présente d'une recherche active, et celle-ci est très disparate. Certains groupes, même écologiquement importants, voire dominants dans certains écosystèmes régionaux, n'ont même pas fait l'objet d'un inventaire et les rares descriptions sont *a priori* classées en hiérarchie descendante. Dans d'autres groupes, existent des descriptions préliminaires et des propositions phylogéniques ; enfin dans quelques cas des études de biosystématique mettent en oeuvre les multiples outils de l'étude biologique des relations et différenciations génétiques (au sens large) et permettent une conception à la fois précise et nuancée de l'espèce (p. 187). Par exemple, les études nombreuses sur le vecteur (l'insecte *Simulium damnosum*) de l'agent de l'onchocercose (la filaire *Onchocerca volvulus*) révèlent que cette similie n'est pas une espèce, mais un complexe plurispécifique identifiable par micromorphologie et cytotaxonomie, dont les taxons sont tantôt des espèces distinctes, tantôt des espèces quasi séparées (rares hybrides) ou des sous-espèces fréquemment hybridées (GOUTEUX, 1977). Il y a donc intérêt, pour chaque travail d'écologie, de connaître le degré de validité des taxons proposés et utilisés.

3.6.5. La taxonomie en pratique

L'écologue n'a souvent de la taxonomie qu'une vision naïve qui le conduit à considérer les identifications et classifications taxonomiques comme ayant une valeur qu'elles n'ont généralement pas. D'un point de vue opérationnel, la prise de conscience, même superficielle, des difficultés de cette discipline permet de concevoir une organisation optimale des données à référence biologique.

1. Taxonomie et taxinomie

Le mot taxonomie a été proposé par DE CANNIULIÉ en 1813 pour désigner la science du classement des êtres vivants. Ce mot a subi trois avatars remarquables :

1) sa signification a été quelque peu réduite, ou précisée, par l'adoption d'un mot semi-concurrent, semi-complémentaire : la Systématique, qui à l'inverse de la taxonomie, met l'accent sur le "système" organisant les hiérarchies proposées (*Systema naturalisé*). La taxonomie porte donc avant tout sur la définition des unités taxonomiques ;

2) le nom général des unités taxonomiques en a été déduit : Taxon, et un journal dévolu à ce type d'études a repris ce nom ;

3) on a proposé, par respect de la racine grecque, une correction orthographique : taxinomie adoptée par certains, peu nombreux, contre l'usage répandu de taxonomie (par exemple SAUVAGE, 1965).

Indépendamment, taxinomie a été retenu pour désigner, dans l'analyse mathématique des données, les méthodes de classification de tout objet en général. Ces méthodes se développent rapidement grâce aux progrès de l'informatique. C'est dans ce sens, aujourd'hui largement admis, qu'il faut l'entendre, en tout cas dans cet ouvrage (p. 374). C'est que la taxonomie et la taxinomie sont fondamentalement différentes et donnent à l'écologue et au biologiste des informations totalement distinctes et complémentaires.

Nous allons le montrer de double manière, fondamentalement et concrètement.

Fondamentalement, l'art de la classification, la taxinomie, s'appuie sur des caractéristiques observées sur des objets. Elle classera par divers outils mathématiques indiqués au paragraphe 6.4. et donnera une classification objective (sur les objets) par un algorithme formalisé en regroupant les observations "homogènes" (au sens de moins hétérogènes que l'hétérogénéité totale de l'information). Appliqué aux organismes, il y a classification par constitution de classes d'individus relativement similaires actuellement.

La Taxonomie est par contre phylogénique : elle porte sur une interprétation des quelques rares fils conducteurs qui nous permettent de reconstituer une parenté qui a existé, c'est-à-dire un phénomène passé. Dans chaque cas, les critères taxonomiques utilisables lorsqu'il y en a, doivent être sévèrement critiqués. Aucune règle n'est applicable *a priori* (= donc pas d'algorithmes), si ce n'est la connaissance intime du mode de vie présent et l'interprétation morphofonctionnelle critique des organes qui nous indique une évolution possible du passé vers le présent.

La Taxinomie porte sur un champ écologique dont le référentaire-temps, réduit à quelques années, est "instantané" par rapport à la taxonomie qui s'efforce de s'appuyer sur l'évolution (p. 177) pendant 10⁹ à 10¹⁰ années, reflétée par la systématique des taxons.

La Taxinomie, portant sur l'état actuel des caractéristiques, ne peut classer des caractéristiques du passé. Ses outils peuvent indistinctement mettre en évidence des groupes de tessons de poterie, des opinions politiques ou des catégories écologiques : ils ne peuvent aborder la phylogénèse, même sur des fossiles (ils classeraient alors les époques).

Concrètement, j'ai été amené à classer des lombriciens de France dont certains se prêtaient à une présentation ordonnée à l'intérieur de genres nouveaux. Dans cette

approche, j'ai donné essentiellement la préférence aux espèces qui, de proche en proche, s'assemblent par ressemblance et forment un "genre" : un tout. Dans un tel classement, des discontinuités plus ou moins profondes apparaissent, permettant des subdivisions en "sous-genres", "espèces", "sous-espèces". C'est la cohérence de quelques caractères-guides qui permet d'ordonner une filiation supposée, incluant l'espèce type du genre. La diagnose de genre joue un rôle très secondaire car les espèces qui de proche en proche témoignent de leur parenté, peuvent devenir aux extrêmes très différentes. Par exemple, le genre *Scherotheca* regroupe des formes géantes (plus de 1 m) de catégorie écologique anécique et des lombriciens modestes vivant en endogés typiques : les caractéristiques traduisant les modes de vie sont assez différentes, mais la parenté par des taxons intermédiaires n'est pas douteuse.

Cette approche, pourtant naturelle et fondée sur le strict respect des règles de nomenclature, devait être soumise à critique par SIMS (1980) dans le cadre d'une étude portant sur un groupe d'espèces artificiellement groupées dans le genre *Allolobopora*, *sensu* Poi' (1941), classiquement utilisé, et où les *Scherotheca* "auraient dû" être classées. Cet auteur s'est servi d'une méthode de classification automatique de l'ensemble des caractéristiques de mes descriptions et a permis de démontrer quantitativement... la validité des catégories écologiques que j'avais empiriquement proposées antérieurement (BOUCHE, 1971). La classification obtenue démontre d'abord les parentés morphofonctionnelles et le mode de vie actuel des lombriciens (p. 246, fig. 3-2). C'est démontrer par l'absurde que les caractéristiques actuelles décrivent l'actuel et non le passé.

2. La nomenclature binominale et sa stabilité

Depuis Linné (1758), l'usage est établi, puis codifié, d'utiliser une nomenclature binominale : un nom de genre *Lumbricus* et d'espèce *terrestris* désigne chaque espèce. Pour des raisons de contrôle, ces deux noms sont suivis du nom d'auteur et de la date de la première description, par exemple : *Lumbricus terrestris*, Linné, 1758.

Cette pratique oblige malheureusement le taxonomiste à établir, en plus d'une diagnose originale d'espèce (dont la valeur est souvent relative), une amorce de systématique : l'attribution de l'espèce à un genre ; ici encore, la confusion est grande dans les groupes peu étudiés. En effet, une pratique fréquente en systématique est de réviser un groupe et d'attribuer les espèces, toutes "révisées" avec un point de vue personnel, dans des genres plus ou moins réorganisés, et ceci même en reclassant les cas douteux. Le résultat est que ces cas douteux (= difficiles) changent de genre à chaque opinion, c'est-à-dire à chaque révision de chaque auteur.

La prudence serait d'avouer l'incompétence et de classer temporairement les espèces (nouvelles ou non) dans des genres arbitraires en attendant un statut, basé sur une systématique solide. C'est adopter une double systématique : BOUCHE (1972). Malheureusement, en pratique, il n'en est rien : il n'est pas fréquent d'avouer l'incompétence. En conséquence, dans tous les groupes mal étudiés, il est nettement plus prudent d'asseoir les analyses sur les noms d'espèces (suivis des noms d'auteurs et des dates de description) en éludant, dans les traitements automatiques, la terminale du nom d'espèce qui souvent (pas toujours : cas invariables) se décline en fonction du nom de genre. Cette base sera d'ailleurs stable même en cas de changement de statut entre espèces et sous-espèces, comme nous allons le voir.

L'espèce est un collectif d'individus identiques à la description originale et surtout (lorsqu'il existe) à l'individu type désigné. Le type sert en toutes circonstances de référence pour trancher les cas difficiles. La règle de priorité s'applique avec quelques rares exceptions. C'est le cas à chaque fois que l'on découvre que deux "espèces" sont identiques : la première description est seule considérée.

3. Nomenclatures biologiques

Un effort d'uniformisation internationale de la nomenclature est entrepris, de longue date, pour établir des règles ordonnant les dénominations des organismes, à partir du travail de Linné. Malheureusement, il n'est pas homogène pour l'ensemble des êtres vivants et ce sont des Congrès Internationaux distincts qui, périodiquement, tranchent les propositions effectuées par des commissions scientifiques indépendantes. Les règnes végétal, proctistes "non protozoaires" et champignons (fossiles ou non) sont régis par un "Code international de la nomenclature botanique" qui règle également le cas des hybrides végétaux. Un "Code international de nomenclature des bactéries" traite du règne des inonères et un "Code international de nomenclature zoologique" des animaux et proctistes "protozoaires". Enfin le foisonnement des créations végétales (cultivars, ...) a conduit à l'élaboration, depuis 1980 d'un "Code international de nomenclature des plantes cultivées".

Ces différents codes présentent entre eux une certaine harmonie sur le fond des principes biologiques les inspirant, mais une certaine incohérence lexicale (voir ci-dessous) qui oblige, au niveau du traitement de l'information, à des précautions de codage (indiquant la dénomination des nomenclatures de référence en cause) qui ne sont généralement pas prises et posent problème en écologie.

4. Taxonomie infraspécifique

A) Sous-espèce

La sous-espèce est utilisée pour désigner un ensemble de populations distinctes des autres ensembles de populations de la même espèce. Presque toujours, cette distinction s'appuie sur des différences biogéographiques de sous-espèces ayant des aires distinctes, quoique ayant des hybrides dans les zones de transition entre les aires subspécifiques. En zoologie, une sous-espèce peut, après étude, être considérée comme bonne espèce (cas des groupes mal connus), ou à l'inverse, les études démontrant l'interfécondité entre "espèces" conduisent à considérer l'"espèce" décrite comme sous-espèce de l'espèce type.

Ainsi *Scherotheca savignyi savignyi* (Guerne et Horst, 1893), *Scherotheca savignyi minor* (Stephenson, 1932), *Scherotheca savignyi nivicola* Bouché, 1972, sont trois sous-espèces de *Scherotheca savignyi* (Guerne et Horst, 1893) (le nom d'auteur entre parenthèses indique que les noms spécifiques et subspécifiques ont été "changés de genre" depuis leur description originale).

En pratique, le statut subspécifique est choisi pour des raisons circonstancielles : absence de certitude quant au statut spécifique ou variétal ; résistance épistémologique prévisible comme dans le cas d'*Eisenia andrei* décrit (p. 255), etc. Du point de vue de l'analyse des données écologiques, la conservation de la seule dénomination subspécifique est suffisante : il n'y a pas d'homonyme dans un genre pour cet ensemble (espèce + sous-espèce) dit "groupe-espèce".

Très souvent dans la pratique des dénominations "spécifiques" commodées sont conservées bien après leur invalidation scientifique. En foresterie, les noms d'"espèces" désignent des formes végétales parfaitement interfécondes, et connues comme telles, au détriment de toute logique biologique et taxonomique : les dénominations, même latinisées, peuvent en pratique s'écarter sensiblement des règles édictées par les codes de nomenclature.

B) Variétés, races, populations et formes

On désigne, sous le nom de variétés, des populations ou groupes de populations ayant des traits remarquables en commun, tout en ayant par ailleurs une bonne aptitude à se croiser avec les autres variétés du groupe-espèce considéré. Il s'agit souvent de populations locales remarquables, il s'agit aussi des résultats de la sélection artificielle des professionnels et des généticiens isolant des individus, conservés en populations séparées (en évitant les croisements) à des fins économiques (race de vache normande ou charolaise ; cultivars de maïs hybride, etc.). On parle

d'ailleurs de cultivars ou de racés pour désigner respectivement les variétés végétales et animales issues de sélection artificielle.

Professionnellement, le terme de variété (ou cultivât) s'applique également aux clones reproduits par voies parthénogénétique, autogame, ou végétative (variétés de chrysanthèmes, ...).

Une population, ou dème, est un ensemble d'individus appartenant au même taxon du groupe-espèce et cohabitant localement. S'il y a reproduction hétérogame, ces individus échangent leurs gènes par fécondation et constituent un ensemble génétique ("pool"). Cette notion est importante dans la mesure où la survie individuelle est un phénomène aléatoire et que la sélection naturelle (ou artificielle) agit sur une population. Elle joue donc un rôle conceptuel précieux tant en biosystématique fondamentale (p. 187, 217) qu'en recherches appliquées.

Les formes désignent souvent de manière très floue, soit des variétés mal caractérisées, soit des variantes individuelles souvent spectaculaires. 11 n'est pas rare en effet que les plantes et animaux diffèrent très sensiblement les uns des autres uniquement en fonction de l'action de facteurs du milieu au cours de leur croissance (polymorphisme mésologique, p. 213).

C) Usages écologiques et économiques de l'infraspécifique

Nous avons vu que les dénominations recouvraient des réalités biologiques ou écobologiques précises mais, qu'en pratique, rares étaient les cas où les dénominations pouvaient être fondées sur des preuves scientifiques solides. Enfin, dans le continuum, potentiellement pangamique allant de l'espèce biologique (collectif pangamique) à la population (pangamiques locaux), il y a des modalités tendant à des hétérogénéités identifiables. Nous devons remarquer que, d'une façon générale, l'homogénéité d'un taxon pangamique sera d'autant plus grande que son brassage génétique sera grand et que, inversement, ce taxon sera d'autant plus localement particularisé que son brassage sera faible (p. 214). En effet, on peut remarquer que plus une espèce biologique est "hétérogène", plus elle est à brassage limité. En pratique, l'indication du taxon + lieu identifie souvent bien ces populations hétérogènes. Tenu compte 1°) de l'état généralement faible de nos connaissances sur quelques millions d'espèces d'une part, et d'autre part 2°) de la limitation de nos moyens d'identification, cette propriété doit systématiquement être utilisée (voir le référentiel des données, p. 296).

Cette indication pragmatique n'exclut nullement la précision analytique au niveau variétal qui peut par exemple conduire à distinguer, à l'intérieur de la même espèce taxonomique, des variétés ayant des modes de vie, donc des habitats et rôles écologiques différenciés.

5. Taxonomie supraspécifique

Les différentes espèces se regroupent en une myriade de genres. C'est pourquoi des classifications plus générales ont depuis toujours été adoptées. Elles divisent l'ensemble des individus en règnes, puis ceux-ci en embranchements (ou phylums), à nouveau subdivisés en classes, puis en ordres, enfin en familles, (p. 251).

Ces taxons hiérarchisés sont eux-mêmes nuancés par des regroupements (super-) ou des subdivisions (sub-). Cet arsenal sémantique étant indispensable pour ordonner l'énorme ensemble des espèces vivantes et fossiles.

Pour l'écologue, il y a notamment lieu d'insister sur un détail technique : la publication (au sens large) de tout ou partie des travaux se rapportant à un taxon quelconque doit tenir compte de cette difficulté. Indiquer un nom vernaculaire local (en français, en swazi ou anglais) ne peut conduire qu'à des erreurs. De plus n'indiquer qu'un binôme scientifique (*Eisenia fetida*) est tout à fait insuffisant. Pour la référence, le nom doit être accompagné du nom de l'inventeur et de la date de première publication (ici : (Savigny 1826) ; en outre, la classe et la famille (*Oligochaeta* : *Lumbricidae*), à la rigueur le nom vernaculaire bien défini (lombricien) permettront une référence scientifique et bibliographique correcte. Sinon, cette référence parviendra, dans cet exemple, aux ... alguologues ! En effet, les codes de

nomenclature zoologique et botanique sont malheureusement distincts (p. 258) et différents par quelques règles. Par exemple le genre *Eisenia* décrit comme ver de terre, est également une algue ou encore le genre *Pieris* en France peut désigner en un même lieu, une plante et un Lépidoptère : ceci constitue une difficulté en gestion d'information relationnelle (p. 317).

Enfin, la hiérarchie cumulaire de la systématique, c'est-à-dire de l'ensemble des taxons, depuis les formes infraspécifiques jusqu'aux règnes, est l'objet d'une perpétuelle ré-interprétation par rapport à notre compréhension de la phylogenèse.

Nous avons déjà dû, au sujet de la nomenclature spécifique, décrire l'obligation où nous sommes tenus de définir un taxon avec une nomenclature binominale : *Nicodrilus longus* ou trinominale *Nicodrilus longus longus* (Ude 1881), ... complétée éventuellement d'indications variétales *Nicodrilus longus ripicola* var. *viridis* Bouché 1972. Comme dans toute analyse, l'intérêt est de pousser, quel que soit le problème de nomenclature éventuel, l'analyse le plus loin possible ; par exemple, la variété *viridis* décrite ci-dessus désigne des lombriciens à fonction beaucoup plus superficielle et hygrophile que la forme typique.

On peut indiquer entre parenthèses le nom de sous-genre qui joue le rôle de subdivision potentielle ou intermédiaire entre le genre et un groupe d'espèces particulières : *Nicodrilus (Rhodonicus) arvernus* Bouché 1972. Ces dénominateurs sont souvent l'objet de changements lors de révisions faites par tel ou tel taxonomiste.

En outre, les usages des noms des végétaux d'intérêt économique ont souvent une déformation pour des raisons techniques ou commerciales, par exemple en horticulture ou foresterie. Les professionnels, horticulteurs, tendent à conserver les dénominations professionnellement reconnues sur le marché, c'est-à-dire celles ayant "valeur commerciale" par exemple, le cas de *Monstera/Phyllodendron* ou *Geranium/Pelargonium* qui dans le premier cas désigne deux écophases de la même plante, dans le deuxième cas, un nom scientifiquement invalide mais commercialement reconnu. Le traitement automatique d'informations ne peut présentement, et tant que cette situation durera, séparer directement ces informations qui, dans le champ écologique, peuvent cohabiter. Des opinions d'experts en Intelligence Artificielle peuvent y suppléer.

L'intérêt de l'écologie est de conserver les informations taxonomiques, les plus analytiques possibles, sous une forme codée dans l'ordinateur, laissant ouverte une réadaptation taxonomique en "sortie" d'ordinateur. Car fondamentalement, un changement de nomenclature devrait être un progrès (et en est un effectivement s'il représente une réelle prise en compte de connaissances nouvelles). Il s'agit d'opinions utilisables en Système-Expert (p. 428).

Il faut reconnaître que toutes nouvelles connaissances doivent être prises en compte et permettent en fait, d'asseoir la taxonomie sur des bases plus solides. C'est un tel processus qui a conduit à une stabilisation relativement bonne des rares groupes bien connus.

La conservation de l'information la plus précise, acquise à un moment donné sous forme codée, facilite un reclassement suivant précisément le progrès reflété par la nomenclature. Nous verrons, en deuxième partie, qu'il s'agit d'un principe d'élaboration des connaissances essentiel : dissocier au maximum l'analyse de l'interprétation.

Or la nomenclature reflète une interprétation. Si un code ne "dit" rien, les dénominations constituent l'outil d'échange intellectuel indispensable. Même si le support magnétique spécifiquement de gestion informatique est codé, rien n'exclut une sortie "en clair" destinée à l'horticulteur, au biologiste ou à l'écologue. Rien n'empêche, en Intelligence Artificielle, d'assortir ce code-nomenclature du point de vue de l'expert, y compris de règles de l'usage (chap. Vil).

DEUXIEME PARTIE

L'ELABORATION

L'élaboration est prise ici, vis-à-vis d'une science, au plein sens du terme : il s'agit d'élaborer les connaissances écologiques, c'est-à-dire d'en accroître l'étendue, d'en promouvoir la qualité et d'en assurer la disponibilité, notamment à des fins socio-économiques.

Il s'agit, au plan quantitatif, du travail nécessaire pour obtenir de nombreux résultats au coût minimal et, au plan qualitatif, d'améliorer en permanence notre compréhension de notre milieu.

Pour cela, il faut constamment développer ce qui est littéralement essentiel aux faits, en éliminant la narration au profit de la phénoménologie, et en organisant faits et interprétations pour un progrès permanent vers des connaissances plus rigoureuses et efficaces. Cette continuité opérationnelle implique à tout instant un plein accès à l'état juste antérieur des connaissances et une critique réelle et objective des interprétations sur l'objet : c'est-à-dire ici tout ou partie de l'écosphère.

L'étendue des connaissances est avant tout un phénomène quantitatif : c'est accumuler les données écologiques vis-à-vis d'un lieu particulier, en fonction d'une action humaine, autour d'une espèce quelconque ou par rapport à un processus défini..., mais c'est aussi un problème d'organisation des données pour les rendre accessibles et donc exclure leur perte pour la communauté humaine.

Rien ne sert d'acquérir des informations qui ne sont plus disponibles soit par perte, soit par fossilisation dans des documents peu ou pas analysés, soit par lourdeur d'exploitation (ou oubli du contenu) de fichiers informatisés, soit enfin par élimination délibérée après un "traitement" considéré comme interprétation "définitive", ce qui est en pratique banal mais contraire à la démarche, à l'éthique et à la logique scientifique.

La qualité de l'écologie est évidemment dépendante du savoir acquis, donc de la quantité des données disponibles susceptibles d'interprétations scientifiques réitérées (aucune interprétation ne pouvant être considérée comme achevée), mais elle résulte aussi de la pertinence des interprétations qui en sont issues.

Cette pertinence est elle-même fonction à la fois de la qualité des données, de leur étendue (quantité) et de l'importance de l'analyse-synthèse pratiquée permettant une élimination systématique des interprétations spéculatives au profit de conclusions réfutables (cf. chapitre I et plus particulièrement p. 25). C'est enfin permettre une utilisation rationnelle des connaissances par l'homme agissant dans l'écosphère.

Ce n'est pas isolément, par l'application de recettes partielles, telle la méthode expérimentale hors contexte, ou par les statistiques probabilistes, ou par l'usage d'un appareillage sophistiqué, qu'une élaboration effective est garantie. La recherche porte sur l'action concrète (acquisition, gestion, traitement des données) et sur la critique de ces actions par l'interprétation provisoire de résultats temporaires qui sont à leur tour confrontés au réel. C'est l'ensemble de la qualité et de l'efficacité (quantité) des travaux qui, replacés dans le champ écologique total, constitue une garantie relative (par rapport à l'état antérieur des connaissances).

Dans ces conditions l'élaboration écologique ne peut être laissée à un amateurisme spéculatif mais doit être effectivement intégrée et criticable. Cette élaboration, qui a été jusqu'à récemment très difficile en raison de l'origine polysémantique de l'écologie scientifique et des limites des moyens de synthèse, est devenue possible.

Il s'agit concrètement de décrire comment cette élaboration est possible et en conséquence comment peuvent (doivent) s'améliorer les connaissances écologiques.

Ces connaissances sont d'abord basées sur des faits constatés et enregistrés sous forme de données initiales ; celles-ci, après corrections (= les Données Initiales Contrôlées), sont la partie perçue des systèmes écologiques. C'est sur elles que s'appuient les interprétations. Les données initiales (après élimination d'erreurs et avant toute interprétation) constituent la partie intangible de la connaissance écologique. Elles peuvent être complétées mais nullement écartées et leur objectivité (liaison à l'objet d'étude) prime sur toute interprétation, nécessairement en partie hypothétique. Précédant l'interprétation envisagée, mais suivant les interprétations antérieures, l'acquisition des données sera d'abord décrite au chapitre IV.

Les données ainsi acquises se présentent comme une somme d'atomes factuels, une masse qui ne prend signification que par la constitution d'ensembles de données interprétées, puis par mise à disposition de ces connaissances.

La grande diversité des faits observés et la carence des moyens de synthèse ont longtemps été si contraignantes que l'utilisation de ces connaissances s'est faite, et se fait encore largement, selon un mode archaïque conduisant à un gaspillage considérable des acquis et à une grande carence de réfutabilité scientifique effective.

La façon dont les données sont utilisées sera décrite au chapitre V : elle conduit logiquement à une gestion moderne et rigoureuse de celles-ci.

Cela n'exclut nullement l'interprétation visant, en chaque circonstance locale ou générale, actuelle ou future, à une synthèse aussi optimale que possible depuis les données relatives au champ écologique. Cette synthèse introduit nécessairement des hypothèses et devra être confortée par de bonnes vérifications.

Les modalités de ces synthèses les plus courantes - ou, semble-t-il, les plus importantes pour l'élaboration écologique - seront exposées au chapitre VI.

Enfin, on n'acquiert pas des données objectives par pur dilettantisme, mais pour poursuivre un ou plusieurs objectifs finalisés.

Usuellement, cette question est discutée d'emblée, puisque c'est la motivation des travaux de recherche. Ceci ne sera fait cependant qu'à la fin car :

1) transcendant tous les objectifs, les acquisitions de données visent à nous apporter une connaissance sur l'écosphère, c'est-à-dire sur notre environnement,

2) chaque objectif particulier tend à répondre à une question (plus ou moins explicite) et la première étape n'est pas nécessairement (ou plutôt ne devrait pas être) l'acquisition de données nouvelles mais d'abord l'utilisation des connaissances déjà acquises... ce qui implique une acquisition, une gestion et une exploitation logique et rigoureuse de données obtenues antérieurement à d'autres fins.

Les progrès très récents, ou en cours, de l'élaboration de l'écologie comme science globale où les processus analytico-synthétiques sont vérifiables, exigent à la fois un dépassement de certains anciens "problèmes" et de méthodes devenues caduques, et imposent une approche organisée de façon très conséquente et efficace. Les pratiques séquentielles anciennes s'estompent pour permettre l'intégration des connaissances. Les démarches d'acquisition, de gestion et d'interprétation des données procèdent mutuellement l'une de l'autre pour donner des réponses temporairement locales (limitées dans l'espace-temps) mais pouvant aussi s'intégrer dans notre connaissance globale de l'écosphère. Le chapitre VII résumera ces concepts intégrateurs et écartera ce qui est devenu faux-problèmes, ou ce qui est encore apparemment limitation technico-scientifique du fait du maintien de pratiques anachroniques d'intégration des connaissances.

CHAPITRE QUATRIEME

ACQUISITION D'INFORMATION

4.1. Introduction à l'acquisition des données

L'approfondissement des connaissances implique de toute manière une accumulation de données relatives à l'objet d'étude de l'écologie : l'écosphère.

En pratique l'écologue, nécessairement spécialisé, exerce des choix en réduisant cet objectif global à ce qu'il peut effectivement appréhender. Il effectue d'emblée une série d'options réductionnistes (p. 41) avec l'espoir que leurs conséquences (= élimination des autres informations pouvant être acquises) auront des effets négatifs minimaux sur les interprétations qu'il désire.

Aujourd'hui, du point de vue opérationnel, nous sommes à la croisée des chemins, ou plus exactement au coeur d'une inversion de perspective, que je justifierai à la fin de cette 2ème partie (p. 441).

Nous continuons de travailler comme autant de spécialistes quasi isolés (ou en tout petits groupes) en procédant selon le schéma :

1) acquisition des données, 2) interprétation, 3) publication des résultats
alors que nos moyens, et une écologie pleinement opérationnelle (fig. 4-3, p. 284), nous commandent d'effectuer :

- 1) la sélection d'une problématique,
- 2) la sélection d'un objectif,
- 3) l'utilisation des données déjà acquises,
- 4) l'expertise critique des connaissances antérieures,
- 5) l'interprétation,
- 6) si les données et connaissances sont insuffisantes, l'acquisition de données nouvelles,
- 7) si 6) est impossible, l'élaboration d'une technique d'acquisition de données nouvelles,
- 8) [l'utilisation de nouvelles techniques,
- 9) la mise à disposition des données nouvelles,
- 10) l'interprétation-synthèse en fonction des 1) et 5).

Il devrait y avoir un parfait bouclage entre connaissances antérieures et élaboration. Les options d'acquisition, procédant des données et connaissances antérieures, devraient seulement viser à élargir le domaine des données aux acquis nouveaux nécessaires. Les choix relatifs à ces options (choix des problématiques, des objectifs, des sites d'études, des prélèvements, des caractéristiques des prélèvements à étudier, des techniques à mettre en oeuvre pour ces caractéristiques) seraient donc antérieures à l'acquisition des données. De ce point de vue dans le plan de l'ouvrage, l'actuel chapitre VII devrait précéder le chapitre IV.

Mais nous ne savons généralement ni raisonner, ni pratiquer cet usage optimal des connaissances écologiques, car cette optimisation est seulement débutante (bien qu'elle soit dès à présent possible et en partie pratiquée, çà et là).

(C'est en conséquence en référence à la pratique classique, en cours d'obsolescence, que j'ai choisi une présentation orthodoxe débutant par l'acquisition des données, en la traitant toutefois dans la perspective d'une pratique intégrée, déjà réalisée sur des cas particuliers.

Il en résulte une situation inconfortable : une ré-évaluation conceptuelle, découlant d'une pratique moderne mais projetée sur une trame orthodoxe périmée.

Pour faciliter la lecture de ce chapitre, c'est d'abord l'élément le plus réduit de l'analyse, la donnée, qui sera présenté, ensuite ce sera l'objet (= le composant systémique p. 91), c'est-à-dire le prélevât, la donnée étant liée à celui-ci (p. 275).

Mais la donnée est, rarement étudiée individuellement, elle l'est comme élément d'ensembles de données, aujourd'hui gérés par des Bases de Données Relationnelles permettant d'optimiser l'usage des liens écologiques. De sorte que l'acquisition de données se fait pour- compléter' ces ensembles ; les données peuvent alors être appréciées par rapport à ce qu'elles apportent à ces ensembles (p. 283) après avoir été saisies (p. 290) sur un support informatique.

En fait, ce jugement est relatif aux modalités d'interprétations (chap. VI) lesquelles peuvent, pour une même donnée, varier considérablement en fonction de la constitution des ensembles de données et des objectifs pour suivis. Les combinaisons de données peuvent être très diverses, une même donnée pouvant être réutilisée pour de nombreuses études de finalités écologiques différentes grâce à son référentiel la liant au champ écologique. Les liens naturels entre données écologiques permettent de constituer pour ces dernières un référentiel unique permettant d'explorer tout type de données objectivement écologiques (p. 292).

En définitive, et au delà des objectifs spécifiques qui ont leurs exigences immédiates, la donnée écologique, contribuant directement à notre connaissance de notre propre milieu, peut être recombinaisonnée indéfiniment et de façon optimale, moyennant le respect de quelques principes élémentaires (p. 298).

4.2. La donnée : l'élément d'information sur le champ écologique

4.2.1. Données et liens (fig. 4-1)

L'acquisition de données est la base de tout travail scientifique et de tout progrès technique, ces données étant ensuite interprétées. L'interprétation des données conduit à des conclusions, des décisions techniques ou de nouvelles connaissances et à de nouvelles hypothèses scientifiques. Cette interprétation exige enfin d'être réfutée par un retour éventuel aux premières données ou/et par de nouvelles acquisitions de données.

L'acquisition d'une donnée est l'ensemble des opérations concrètes que l'on fait antérieurement et jusqu'à l'obtention d'une donnée initiale enregistrée correctement (y compris son contrôle). Cette définition porte sur le concret et exclut donc les démarches hypothétiques conduisant à cette acquisition d'informations.

En fait, le choix d'acquiescer telles données relatives à telle(s) caractéristique(s) relèvent d'options qui sont des hypothèses (p. 41, 267) sur le progrès écologique par Processus Répétitifs d'Accroissement des Connaissances (p. 357).

Le domaine de l'écologie et de ses applications étant vaste et très divers une certaine confusion méthodologique et corrélativement terminologique règne en ce domaine pourtant crucial. Nous avons déjà situé ces données dans leur cadre d'acquisition (chapitre I), plus précisément dans le champ écologique (p. 159) de l'écosphère (p. 195).

Une donnée est un atome (au sens littéral : insecable) d'information opérationnelle (p. 89). Elle peut être qualitative : rouge, *Lumbricus terrestris*, mm, ou quantitative : 22 ; 684,5... ou enfin floue : vieux, grand, lourd.

Isolément une donnée n'a aucun sens : "bleu" ou 2,5 n'ont aucun sens alors que *Lumbricus terrestris* rouge commence à signifier quelque chose grâce au lien entre *Lumbricus terrestris* et rouge, de même 2,5 g entre 2,5 et g et encore plus entre *Lumbricus terrestris* rouge (de) 2,5 g.

Une donnée pour être signifiante est donc reliée par des liens à d'autres données ; la description de ces liens logiques sera faite plus bas mais constitue une propriété naturelle (ou anthropique) complémentaire aux données et est aujourd'hui totalement explicite (p. 296, 321). Une donnée fait partie d'un ensemble : 2,5 g fait partie de l'ensemble des nombres (2,5) et g des unités de mesures pondérales, elles-mêmes sous ensemble des unités du Système Métrique International. Les données des ensembles peuvent en effet appartenir par leurs liens à plusieurs ensembles, et chaque ensemble être éventuellement subdivisé en sous-ensembles (jusqu'à la donnée) et être réciproquement lui-même un des sous-ensembles d'ensembles plus globaux. Les liens sont alors des propriétés d'ensembles de données.

Poursuivons l'analogie chimique sur ce domaine de l'information écologique (p. 88). Une donnée "atome d'information" fait donc partie d'ensemble(s) où chaque donnée-atome est liée à d'autres données-atomes. Une certaine configuration "moléculaire" multidimensionnelle des liaisons de ces "atomes" en résulte. Exemple : *Lumbricus terrestris* - rouge - 2,5 g - pourra constituer une "molécule" (vue simple) qui peut devenir une "macromolécule" extrêmement complexe. Par exemple, *terrestris* est lié au genre *Lumbricus* (ensemble des espèces de ce genre).....l'individu de 2,5 g en cause est lié à une portion d'espace liée à un dispositif expérimental, un type de sol, un climat, un dossier de recherche, ce dernier à un contrat, un chercheur responsable..

Une information peut porter sur un objet particulier, précis, par exemple : un individu de *Lumbricus castaneus* (Sav. 1826) pèse 360 mg. Ceci comporte une information objective, le poids de l'animal, mais la phrase décrit également un

dénombrement[^] 1), une espèce : *Lumbricus caslaneus*, une relation générique (*caslaneus* est dans le genre *Lumbricus*), le nom d'auteur abrégé (Savigny), l'indication que cet auteur n'a pas attribué cette espèce initialement dans le genre *Lumbricus* (la parenthèse) et l'année de première publication de la description par Savigny : 1826. Il s'agit d'autant de données qui peuvent être contrôlées et exploitées selon des logiques dépendantes ou indépendantes.

En pratique, on acquiert des données pour au moins un objectif de sorte que, par exemple, l'on étudiera la variation pondérale de l'individu décrit ci-dessus en fonction du temps. Toutes les informations autres restent constantes et l'on enregistre donc celles-ci une fois et une seule tandis que le poids et le temps, variables, seront enregistrés plusieurs fois. Ils sont liés à l'ensemble poids et liés à la série des dates.

On constate, par cette description, que deux concepts vont caractériser l'information écologique : les données sont enregistrées et elles sont organisées par des liens en ensembles. L'information a deux supports : les données et les liens (ou relations).

Ainsi dans notre exemple, l'individu sera à chaque fois extrait de son milieu, nettoyé, porté sur une balance... et le poids ainsi que la date de collecte seront enregistrés (deux données à chaque fois) en relation avec son identité (= associateur, p. 282). On contrôlera ensuite que la série de valeurs pondérales obtenue n'a pas de données aberrantes (— dans l'échelle des poids possibles pour le taxon : détection d'erreur d'enregistrement et éventuellement d'identification) et l'on enregistrera définitivement les données ainsi contrôlées comme "la meilleure péri ept mu objective".

L'acquisition d'une donnée peut faire appel à des techniques très simples (observation directe) ou très sophistiquées (analyses chimiques complexes pour séparer un constituant précis avant sa quantification par des systèmes automatiques d'étalonnage en fonction d'une concentration de référence). Dans ce deuxième cas, bien que l'objectif ne soit que d'acquérir une donnée, on enregistre en fait de très nombreuses "prédonnées" relatives à la techniques d'acquisition car chaque modalité technique modifie le résultat final, lequel n'apparaîtra qu'après un calcul sur d'autres prédonnées préalablement enregistrées (à moins que le dispositif soit informatisé et effectue directement le calcul de la donnée recherchée). On conçoit dès lors que l'acquisition de données puisse faire appel à des techniques délicates et complexes.

Le mot donnée, très général, désigne donc un atome d'information décrivant pour partie un objet concret. (Cette information a en quelque sorte deux raisons d'être ; 1) elle est un acquis assuré initialement pour un objectif scientifique ou technique et de ce point de vue, elle résulte d'options ayant une motivation initiale précise ; 2) elle est par ailleurs une information en général et de ce point de vue, doit être gérée dans une Base de Données Relationnelles pour permettre de futures réutilisations et un éventuel travail synthétique.

Ce dernier aspect est essentiel en écologie - science globale - où la synthèse à partir de données analytiques est fondamentale. Cela implique que la donnée enregistrée puisse être individuellement indépendante de l'objectif initial d'acquisition non dans son choix mais dans son référentiel (p. 296), ce qui n'exclut pas une liaison explicite à cet objectif.

Il faut maintenant établir une distinction très nette entre la Donnée Initiale Contrôlée (DIC), issue du champ écologique, et la Donnée Secondaire Elaborée (DSE) issue d'interprétations, même minimales. La première doit être le reflet le plus exact et rigoureux possible de la portion du champ qu'elle est sensée représenter et être directement référée à celui-ci. La seconde résulte d'un choix interprétatif impliquant une proposition (par exemple : paramètre, limites d'une aire, moyenne, prédiction). Les DICs résultent d'options de sorte qu'un ensemble de DICs (par exemple, 3 valeurs de la biomasse végétale d'une prairie) peuvent être considérées selon des appréciations externes comme insuffisantes pour représenter un tout (une estimation de la biomasse

de cette prairie). C'est l'ensemble qui est insuffisant, c'est la moyenne, une DSE calculée sur 3 DICs, qui est suspecte, mais chaque PIC prise isolément est une valeur représentant une biomasse d'un prélèvement de ce champ et reste valable pour toute réinterprétation différente (notamment dans ce cas par ajout de DICs pour établir une DSE "moyenne" plus fiable).

Les DICs sont les données objectives issues du champ écologique ; les DSEs sont des interprétations des DICs. Les unes et les autres nous donnent une perception de la réalité écologique (p. 31). Les DICs dépendent seulement de l'acquisition, tandis que les DSEs dépendent aussi des hypothèses d'interprétation (= propositions). On conservera donc les DICs comme informations fondamentales sur les systèmes

A côté de ces études écologiques, le chercheur peut être conduit à simuler dans des dispositifs artificiels (que nous nommerons microcosmes, p. 400) des modalités expérimentales reflétant les hypothèses qu'il porte sur certains mécanismes. Ces microcosmes fournissent des Données Expérimentales sur les Potentialités des processus proprement écologiques. Ces DEPs, acquises hors champ écologique, n'ont pas de référentiel avec celui-ci et ne dépendent que du dispositif artificiel choisi et des hypothèses de ce choix : DSEs et DEPs dépendent intrinsèquement, de propositions et non les DICs (p. 288).

Les données enregistrées peuvent donc être des DICs, DEPs (prononcer dèp) ou DSEs (prononcer dsé). Il existe aussi des prédonnées, n'ayant qu'une valeur transitoire au niveau des dispositifs techniques d'acquisition. Ces prédonnées (telle la tare d'un récipient) sont sans signification par rapport à l'objet d'étude (le prélèvement) mais permettent d'intervenir dans le calcul d'une DIC ou DEP. DIC, DSE, DEP sont des abstractions, la DIC est directement concrétisable par son lien au réel, DSE < DEP sont réfutables (p. 25).

4.2.2. Sélection des données et options (fig. 4-3, p. 284)

L'analyse est l'ensemble des opérations techniques qui vont isoler la donnée du champ écologique. La DIC en est le résultat et reflète extrinsèquement, c'est-à-dire par son existence et non sa valeur, les options d'acquisition effectuées (p. 41) en ce sens que d'autres choix auraient pu être faits qui auraient abouti à des données différentes.

Les choix effectués lors de l'acquisition résultent donc d'hypothèses dénommées options. Ces options portent sur la pertinence des caractéristiques retenues pour compléter au mieux la globalyse (p. 37) de la portion du champ écologique sélectionnée.

Si l'on considère le champ écologique total de l'écosphère, aucun écologue, aucune équipe de recherche ne peut le prendre en compte. Obligatoirement une problématique - de préférence explicite - conduira à sélectionner un domaine d'étude puis à focaliser sur certaines variables.

D'un point de vue plus opérationnel, on précisera même des objectifs de recherche et l'on constatera que l'on peut :

- déjà disposer des données (p. 443),
- acquérir de nouvelles données nécessaires en tenant compte des moyens et techniques d'acquisition disponibles,
- ne pas disposer de données antérieures, ni acquérir de données nouvelles, car l'on manque de techniques adéquates (cf. adéquation des données, p. 288) et que ces techniques doivent préalablement être développées,
- manquer de moyens humains ou financiers.

Il y a donc successivement trois "réductions" par

1- option sur la problématique,

2- option sur l'objectif (concret),

- sélections sur les caractéristiques des données souhaitables et possibles conduisant à choisir quatre options :

3- une portion d'espace-temps de l'écosphère : option sur la localisation d'étude,

4- la modalité de sélection dans cet espace-temps global des portions d'espace-temps à laquelle chaque donnée est liée : option sur le prélèvement,

5- option sur la distribution temporo-spaciale des prélèvements dans le site,

6- les techniques d'analyse chimique, physique ou biologique permettant de tirer de la composition globale des prélèvements, les DICs de caractéristiques sélectionnées : options analytiques.

Enfin les modalités de saisie de données seront arrêtées ; celles-ci n'ont pas d'influence sur la qualité de la globalyse (partie perçue du champ écologique) mais sur son volume (— efficacité d'acquisition).

Ces 6 options doivent conduire à des données individuellement indépendantes des interprétations. Les options se font pour un objectif mais les DICs une fois acquises doivent être indépendantes intrinsèquement de cet objectif.

Il s'agit là d'une des grandes difficultés intellectuelles de l'écologie moderne. Jusqu'à récemment, les contraintes de la période pré-informatique, puis de l'informatique classique (sur fichier), ont conduit à optimiser les modalités d'acquisition selon des pratiques qui s'avèrent aujourd'hui négatives.

1) En cloisonnant l'information acquise qui n'est ensuite plus intégrable par rapport au champ écologique par pertes de références à celui-ci.

2) En pré-interprétation des données avant acquisition, ce qui à certains égards est scientifiquement contestable et interdit ainsi une logique ouverte des connaissances.

Je commenterai ces aberrations, qui ont eu leur justification pratique, aux paragraphes 5.2., 7.3.4. et 7.3.5.

Il est en effet souvent très difficile de dissocier intellectuellement les interprétations des analyses car les recherches sont faites pour un objectif visant à une interprétation. Si cet objectif est légitime et doit être explicite, le mode d'acquisition une fois arrêté doit fournir des DICs (données analytiques) non pré-interprétées : si l'on y prend garde, c'est toujours le cas.

Avec les moyens modernes, les pré-interprétations doivent normalement être éliminées. En informatique classique (p. 341) les données ont été, après analyse, codées avec perte d'information. Par exemple dans CODRON *et al.* (1968), les pH de sols sont enregistrés par lots de valeurs, regroupées en 1/2 unités pH, alors que la meilleure information est celle du pH-mètre : 3,6 ; 3,7 ; 4,8... La définition du lot résulte d'une pré-interprétation, d'un jugement de valeur, qui peut toujours être remis en cause. Les contraintes d'espace sur fichier justifiaient ces pré-interprétations ; elles ne doivent plus aujourd'hui être pratiquées qu'au niveau de chaque interprétation par allotements pendant la tablation (p. 363) et en aucun cas lors de l'acquisition puis de la gestion des DICs.

Dans certains cas, cette pré-interprétation est liée à l'option analytique :

1) par exemple, avec l'usage d'une technique mesurant une caractéristique que l'on considère comme représentative d'une autre.

Cette transposition interprétative devra être évitée au stade acquisition et il y a lieu de noter la DIC obtenue et non celle souhaitée. Ceci doit être respecté même si à l'interprétation on considère la différence entre DIC obtenue et donnée souhaitée comme "négligeable" ou si l'on pratique ultérieurement cette conversion (p. 365). Cette opinion (= "négligeable") n'a de sens que dans le cadre d'une interprétation spécifique ; la même DIC dans un autre cas pourra être considérée avec sa vraie signification. Par exemple, l'appareil d'extraction de Berlese permet une collecte, à partir d'un prélèvement de sol de 10 *Folsomia candida*. Cette donnée est une information indubitable sur la présence de *F. candida* dans le prélèvement. Par contre, le dénombrement pourra, selon le degré de rigueur souhaité, être considéré comme utile pour l'estimation du niveau de population du site dont est issue la prise de sol, ou au

contraire comme trop biaisé par les imperfections de cette technique (VANNIER, 1970). Associé à la donnée, le descriptif technique (DT) permet de connaître l'option analytique (ici d'extraction faunique à partir du sol) du dénombrement de *F. candida* ;

2) par exemple, les méthodes de classement des données qualitatives, notamment taxonomiques, reflètent l'idée que l'on se fait (d'un taxon, d'une couleur, ...) de la référence analytique correcte. Ici encore le descriptif technique de la technique d'analyse (ouvrage taxonomique, description initiale d'auteur) permet de reconnaître le niveau d'analyse dans la globalyse effectivement obtenue (par exemple, l'espèce *Eisenia fetida* (Savigny 1826)... est couramment un mélange d'espèces jumelles dont *Eisenia andrei* Bouché, 1972 est présentement un élément plus analytique, p. 255) ;

3) par exemple, indiquer que le semis d'une céréale a eu lieu 153 jours avant la récolte est une information qui ne peut être utilisée que pour une interprétation de croissance. Noter l'acte semis le 10/2/78 et l'acte récolte le 10/6/78 permet d'autres interprétations (par exemple sur la date moyenne des semis pratiqués dans une région). L'acte semis lui-même est en fait

a) un apport biologique : Ex. maïs 80000/grain/ha,

b) un passage de tracteur-semoir dont on peut noter, selon divers objectifs, la pression moyenne sur le sol ou/et la durée du travail ou/et la consommation/ha de fioul.

Il est fréquent que l'on ne dispose plus que de données pré-interprétées qui, faute d'un référentiel cohérent, sont inexploitable. Alors que le travail d'acquisition avait été fait, ces résultats initiaux utilisables à tous points de vue, sont perdus ; ce qui ne se serait pas produit si l'enregistrement des DICs avait été correctement conduit.

La pré-interprétation est une pratique très courante, qui doit être débusquée, car elle constitue, sans contrepartie, une perte archaïque de nombreuses informations.

4.2.3. Liens des données au champ écologique

Notons que la donnée ne vaut extrinsèquement que par ses liens. Ce sont eux qui permettront de l'associer dans des ensembles de données. En outre, en écologie la donnée devra obligatoirement être écologiquement référée sinon elle ne contribuera pas à une interprétation.

Certaines données usuelles peuvent ne pas être écologiques, telles un insecte de collection sans étiquette : il peut faire l'objet d'une étude zoologique (morphologie comparée) mais non écologique ; c'est encore le cas d'un dispositif expérimental arbitraire (microcosme sans référence démontrée au champ écologique, p. 400).

Il ne s'agit pas uniquement d'accumuler des données analytiques mais de le faire pour permettre d'interpréter synthétiquement la globalyse puis de confronter cette synthèse aux données globales que nous avons du champ écologique (p. 41). Une donnée doit donc être initialement reliée à d'autres données à la fois pour atteindre un objectif particulier et à la fois pour éviter sa perte dans un quelconque ensemble de données non fiables au champ écologique.

La donnée est d'abord repérée dans l'espace-temps par sa situation qui, dans l'écosphère, pourrait se résumer par la longitude, la latitude, l'altitude et la date (symboliquement les repères sont, de façon généralisée, X, Y, Z, D). Nous verrons, au paragraphe 4.6.4., que, en pratique, des modalités précises et systématiquement méthodiques existent pour situer une donnée.

La donnée est concrètement issue d'un prélèvement (notion développée page 275) qui peut fournir plusieurs données ; le prélèvement est un lien entre les données décrivant ce prélèvement.

Le prélèvement peut être prélevé *in situ* puis la prise analysée (cas de la collecte d'une prise de sol, d'eau, de bois, ...). Il peut être l'objet d'un relevé par analyse directe *in situ* ou transposition sur supports artificiels analysés ultérieurement (cas de la photo d'un troupeau d'éléphants puis du dénombrement sur celle-ci ; cas d'un

enregistrement multispectral par satellite artificiel). Dans tous les cas, le prélévât fournit une donnée d'une caractéristique ou des données chacune de caractéristiques différentes : il est l'origine de(s) donnée(s).

Les données issues d'un même prélévât sont spatiotemporellement liées : il s'agit d'un lien fondamental des données, extrêmement important pour l'étude future de l'information. Le même objet est ainsi analysé sous différents angles et est l'enchaînement cohérent d'analyses décomposant de façon de plus en plus fine la composition de l'objet (telle la séquence —•- masse totale — niasse de matière organique totale —masse de la fraction libre de cette matière organique — masse de la portion de taille comprise entre 200 µm et 50 µm de la précédente) ; le prélévât permet des données complémentaires (tel le taux respiratoire global, masse de sable, de limon, d'argile, de racines, de lombriciens, de matière organique morte, d'*Orihatei*, ...) et une accumulation importante d'informations ayant trait à ce même prélévât.

Les diverses caractéristiques d'un même objet étudié sont complémentaires. Elles sont choisies à la fois en fonction d'objectifs de recherche mais aussi des moyens tant matériels que conceptuels. Elles sont la globalyse de sa composition (p. 37), les données de situation précisant le prélévât par rapport aux deux autres référendaires (= temps et espace).

La donnée est également liée aux unités du prélévât. Parmi ces liens aux unités notons

1) les unités des données issues de prélèvements euclidiens, celles qui se rapportent à une valeur soit exprimées directement : 25 mg Cd/kg, soit celles qui sont liées aux cotes d'un prélévât (p. 277) permettant le calcul d'un volume (Exemple : 10 individus de *Tipula paludosa* par galette de sol de 50 cm de diamètre prise à la surface d'un sol sur 5 cm), (le sont des données "volumes-dépendantes" exprimées par unité volumique (parfois pondérales) ou par des cotes ;

2) les unités des données issues de prélèvements cartésiens sont exprimées par rapport à la surface (Ex. 400 mg/ha de Benomyl) ou sont référées à un prélévât ayant les cotes horizontales (largeur, longueur ou diamètre) permettant d'exprimer par rapport à une surface ;

3) les DICs-cinèses sont des données durée-dépendantes, soit par l'unité (25 cm³/vmn), soit par la connaissance de la durée du prélévât (35 mn/ha de travail). Les cinèses peuvent elles-mêmes être euclidiennes (débit de 25 g Cd/tm³/mn) ou cartésiennes (flux de l(Cd/m²)).

L'organisation d'une série de prélèvements ponctuels, techniquement de nature différente, mais caractérisant un même point, accroît souvent considérablement la somme des données analytiques caractérisant un point (p. 378). Le lien spatiotemporel des prélèvements joue un rôle essentiel (au sens littéral) trop souvent perdu de vue. En écologie moderne, tant appliquée que fondamentale, cette propriété doit être impérativement conservée.

Les pratiques anciennes, où les spécialistes interviennent successivement et dans le désordre dans une parcelle, chacun assurant son propre échantillonnage selon des modalités ("plans d'échantillonnage") hétérogènes, pour caractériser indépendamment chaque particularité de la parcelle par une moyenne dont les données initiales sont perdues et temporo-spatialement ni repérées ni liées, constituent probablement le gâchis de moyens le plus remarquable sur la connaissance de notre milieu. Aucun habillage statistique ne peut justifier cette perte (p. 300. 307).

4.2.4. Collecte des données

On peut distinguer diverses modalités de collectes (= actions initiales d'acquisition de la donnée), c'est-à-dire les relevés, les prises et les interceptions se rapportant à des prélèvements.

1. Le relevé

Le relevé est une prise directe d'informations sans prélèvement concret d'objets dans le milieu. Ceci est particulièrement vrai pour tous les prélèvements intransportables (relevé topographique des pentes, orientations, type géomorphologique, etc.) mais d'une façon générale pour toutes les informations acquises *in situ* (relevé climatologique, relevé de la végétation, etc.). Cette prise d'information peut 1) être simultanée avec l'analyse définitive et porter directement sur des données initiales qui après contrôle d'erreurs seront des DICs ou 2) être enregistrée sur des analogiques (photographies, empreintes, enregistrements sur bandes de papier, ...) qui seront ultérieurement analysés. Les analogiques sont des objets non écologiques reproduisant, par analogie, une information issue du champ écologique et non encore interprétée comme DICs. Le terme enregistrement, plus générique, inclut par exemple ces analogiques et l'enregistrement des prédonnées, données, DICs.

2. Le prélèvement

Il s'agit d'un acte séparant 1 ou n prélèvements de leur contexte écologique pour les étudier souvent en mettant en oeuvre des moyens analytiques inapplicables directement *in situ*, et supposant usuellement la destruction de la prise, résultant du prélèvement, pour isoler la donnée de la caractéristique recherchée. Le prélèvement prend des formes très variées en fonction du but recherché. Sans précision, il a trait à des caractéristiques d'état. Le produit du prélèvement est une prise (*cf.* ci-dessous).

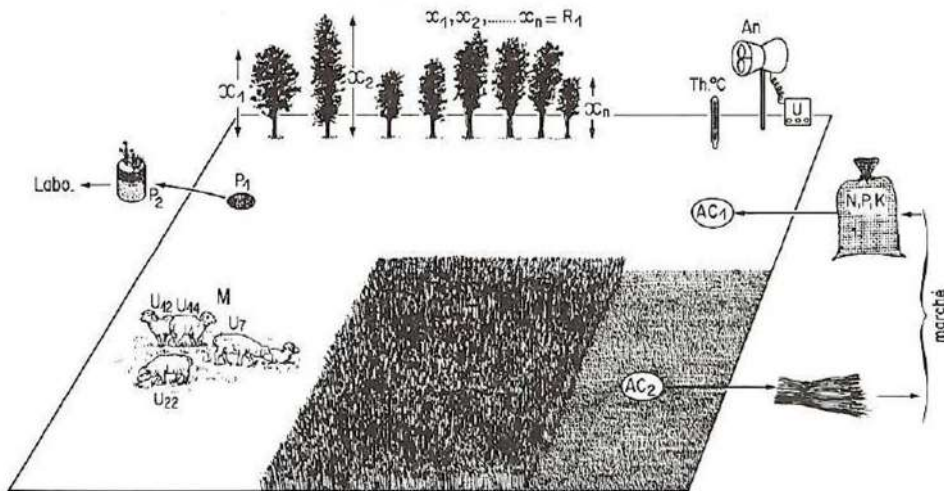


Figure 4-1 - Les collectes de données ; sur variables d'état : nombre et poids des moutons M, hauteur des arbres RI, température (Th), état du sol (PI) ; sur cinésiques ; anémomètre (An), apports (AC1), exports (AC2) (fig. 1-4, p. 45). Les données sont collectées par relevé (RI, MI) ou après enregistrement (Th, An) dans une unité, spécialisée (J) ou par prélèvement (PI) d'une prise (P2, AC1, AC2) et interception de cinésiques (An, AC1, AC2) y compris marquage de composants (M) (U7, U12, ..., Un). Les actes d'apports au système (AC1) ou d'exports (AC2) ont des motivations socio-économiques (fig. 1-13, p. 104).

3. L'interception (fig. 1-4, p. 45)

C'est le mode d'obtention des DICs-cinésiques. Une interception-relevé permet d'obtenir directement une donnée ou un analogique cinétique (cas de l'anémomètre, du

rhéomètre, du comptage d'oiseaux passant un col, d'une lecture radar de passages de papillons, etc.). Il y a traduction de débit (= quantité *us* temps, ex : nombre d'oiseaux/heure) parfois uniquement exprimé en tant que vitesse (de l'air, de l'eau) en considérant la section du passage comme "quelconque" : il s'agit alors de flux (= vitesse *us* surface). L'interception-prélèvement est l'interposition, dans une cinèse, d'un capteur accumulant l'élément étudié en le détournant de sa destinée "naturelle". Ceci prend les formes les plus diverses (filets de capture d'oiseaux, récepteurs de litière au cours de la chute de celle-ci depuis la frondaison vers le sol, piège-trappe d'animaux, prélèvement automatique d'aliquotes d'eau dans un réseau hydrique, pluviomètre, ...). L'interception-prélèvement permet ultérieurement des analyses poussées de la prise. Il ne se rapporte pas à un compartiment mais à une cinèse. Si dans les interceptions-relevés, les données acquises sont souvent continues (cf. enregistrement thermique), les interceptions-prélèvements conduisent usuellement à des données discontinues dans le temps. Le choix de la durée du prélèvement est important car il limitera la finesse de l'analyse temporelle.

4. La prise

C'est un objet concret qui n'est plus dans le champ écologique mais qui fournira, après analyse, des données sur ce champ. Ce sont, par exemple, les analogiques de relevé, telle une photo, les prises de prélèvements, tel un flacon d'eau contaminée, les analogiques d'interception-relevé, telle la bande d'un thermohygromètre et les produits de l'interception prélèvement, tel le pot-piège. Avec les données non saisies, ils constituent (avant ou après analyses et saisies) des collections (p. 291), c'est-à-dire des objets matériels issus de collectes et conservés pour de futures analyses.

5. 1-es actes (ou actions anthropiques)

Les actions anthropiques ou actes constituent les prélèvements reliant les systèmes écologiques aux motivations socio-économiques qui ne relèvent pas que de la régulation spontanée de systèmes écologiques (p. 96).

Les données qui en sont issues sont essentielles car elles permettent, en respectant totalement le caractère scientifique et opérationnel de l'écologie, d'articuler cette discipline aux préoccupations humaines (p. 28, fig. 1-13, p. 104).

Les actes ne diffèrent pas concrètement des modalités classiques de collecte de données : relevés, interceptions ou prises, mais ils présentent intellectuellement des difficultés qui tiennent :

1) au fait que nous confondons la finalité de nos actions techniques avec l'acte agissant sur le système écologique considéré. Par exemple, on n'a pas "traité contre le parasite X" mais apporté y grammes/ha du pesticide z,

2) au fait que l'acte est souvent instantané et semble extérieur au système (alors qu'il est exnéat ou A-général de celui-ci). Par exemple, dans le cas ci-dessus, c'est l'apport du pesticide z le jour j qui est l'acte... quels que soient les délais de réponse (= effet perçu) de cet acte dans le système écologique le recevant.

Nous allons, en prenant pour exemple des actes techniques agronomiques, étudier ces difficultés intellectuelles et en tirer les conséquences pratiques pour l'acquisition d'informations.

Les finalités apparaissent, classiquement dans la terminologie et influent les choix analytiques en créant une confusion dans la globalyse (hétérogénéité des niveaux de perception et d'analyse) ; on parle de semis alors qu'il s'agit d'un apport de graines lié à d'autres actes, mécaniques notamment (couleurs du semoir, charge des machines, etc.). L'acte technique doit être perçu par rapport au prélèvement (p. 275) c'est-à-dire à la portion du champ écologique étudié. Très souvent en agriculture il s'agit de l'ensemble d'une placette (p. 293) choisie dans une parcelle cadastrale recevant un acte.

Il ne faut pas confondre l'acte et ses conséquences : l'apport de 400 g/ha de benomyl sur une céréale est quasi instantané, tandis que son action sur le système est étalé dans le temps (action fongique, en tant que fongicide, puis sur tout le système en tant que géodrilicide ayant des conséquences pendant des années, Bouche, 1984a). En cela, cet acte ne diffère en aucun cas des conséquences de toute variable externe agissant sur le système : par exemple, un apport thermique élevant la température du système accélère la croissance végétale ; cette croissance restera acquise par le végétal, puis sur ses futurs élaborais (tissus morts, ...) et l'organisation des éléments nutritifs (N, P, K, ...) dans la matière organique.

Du point de vue de l'acquisition de données objectives, on notera simplement la nature de l'acte (= composition, par exemple benomyl), sa situation temporo-spatiale (date, durée, situation, par exemple : 22/06/84, 0 - instantané, placette B de la parcelle xx) et si nécessaire sa quantification (par exemple : 400 g/ha). L'acte peut avoir une durée contribuant à mesurer son intensité, par exemple : vache allaitante, 2/04/85 - 18/04/85 (ou 16 jours), parcelle Z, 0,6 vache/ha, ou par exemple : tracteur-semoir, 18/04/85, 25 mn/ha, parcelle K, 65 CV (= 47,7 kW).

Du point de vue de la globalyse, des distinguos existent également. On peut considérer l'usage d'une parcelle globalement (culture de maïs, année 1985 ou prairie permanente pâturée, année 1982) ; c'est particulièrement le cas dans l'étude des "précédents culturels" qui peuvent être plus précisément décrits en terme d'assolement.

L'étude des actes proprement dits, c'est-à-dire des actions se succédant au cours d'une culture, nécessite une analyse toute différente qui n'est pas toujours explicite et souvent implique des actes conjoints sous-entendus par le praticien, mais qui, n'étant pas explicites, ne sont pas saisis dans les données (agro)-écologiques.

L'acte benomyl, 22/06/84, instantané, placette B, parcelle xx, pris en exemple ci-dessus est nécessairement accompagné du mode d'épandage qui est une information importante pour certaines études. On pourra, si on s'intéresse à la physique du sol (compaction par roue des machines) ou encore aux bilans énergétiques des techniques agraires, noter conjointement : tracteur pulvérisateur. 22/06/84, 15 mn/ha, placette B, parcelle xx, 65 CV, (ou/et 2 l fioul/h).

Autre exemple, le fauchage peut être considéré pour son "effet biologique de coupe", tracteur-faux, 28/06/85, instantané, coupe à 5 cm, ou/et pour la sortie du système (= récolte) traduite par une quantité de poids sec de foin par hectare.

Remarquons ici que tout à fait normalement plus l'analyse est précise, c'est-à-dire décompose l'acte, plus le nombre de caractéristiques étudiables croît et plus il est nécessaire d'exercer des options d'acquisition pertinentes. Ceci n'exclut pas la cohérence d'acquisition vis-à-vis des objectifs d'étude et d'une gestion des connaissances efficace (chapitre V).

Dernier point, les actes ne sont pas que des "entrées dans le système", mais également des sorties, telle la récolte de foin illustrée ci-dessus ou la sortie d'un troupeau d'une parcelle (pour le suivi du troupeau, voir prélèvements instables, p. 279). Les actes peuvent être regardés comme les actions élémentaires d'un itinéraire technique (*sensu* SEBILLOTE, 1978) perçu sans connotation socio-économique et de façon généralisée (séquences d'actes des travaux publics, des pasteurs, des forestiers, ...).

6. Les marquages

Les marquages reviennent à marquer un compartiment à un instant par un moyen quelconque afin de suivre, en fonction de l'espace-temps, le devenir des composants marqués issus de ce compartiment.

Cette transformation (p. 46) en fonction de l'espace-temps implique des cinèses. 11 s'agit d'un objet d'étude essentiel de l'écologie cinétique car il permet ensuite par

des prises ou relevés à partir des variations des états marqués/non marqués de connaître le devenir de la composante marquée.

Ces marquages peuvent porter sur tout niveau de la composition - du plus "fin", celui des éléments chimiques pour lesquels on Utilisera les différences de concentrations isotopiques, ou encore, du fait de l'instabilité de certains isotopes, en enregistrant la radioactivité issue de ces isotopes - aux compartiments les plus grossiers (étiquetages, coloration, baguage, marquage du bétail, etc.).

Dans la pratique, on peut distinguer des marquages spontanés ; ceux qui, sans intention explicite de la part du chercheur, permettent de suivre un compartiment remarquable et les marquages intentionnels ou expérimentaux où le chercheur est techniquement à l'origine du marquage. Dans le premier cas, l'écologue, en observateur, saisit une opportunité, dans l'autre, en expérimentateur, il la crée.

Aucune connotation péjorative ne doit être attachée à l'observation... Au contraire, c'est l'habileté à choisir un tel marquage spontané qui prévaut sur celle, conceptuellement facile, de la créer qui mérite l'attention ; l'observation ne perturbe pas le marquage du système étudié puisque ce marquage pré-existe.

Les marquages non intentionnels sont notamment ceux qui sont liés aux objets datables par rapport, à une séquence "chronologiquement ordonnée" : stades successifs de développement d'un insecte ou perte graduelle de radioactivité naturelle ^{14}C par exemple. L'interprétation de telles données est toutefois souvent délicate, la relation temporelle étant rarement exempte de difficultés opérationnelles ou interprétatives (chevauchement des stades et diversité des variables du développement de chaque stade dans le premier exemple, variation possible de l'incidence initiale du ^{14}C et contamination ou perte en ^{14}C de la prise dans l'autre cas).

Sans être expérimentales, certaines opportunités découlent historiquement d'activités humaines et sont donc chronologiquement repérables. Par exemple, l'intense campagne d'essais nucléaires atmosphériques soviéto-américains a marqué d'isotopes remarquables de nombreux systèmes écologiques planétaires. Autre exemple, le changement du delta ^{13}C des produits végétaux résultant du passage d'une production de nécromasse végétale à photosynthèse en C3 à une culture émanant des produits en C4 (GUILLET *et al.*, 1986 ; SCHWARTZ *et al.*, 1986) (p. 135). Une telle indication peut être combinée avec les marquages permettant une datation renseignant par exemple sur la chronologie de types de végétation (GUILLET *et al.*, 1988). De même certains produits industriels tels, les engrais azotés, peuvent être suivis dans les cycles géochimiques des milieux ruraux en raison d'un delta ^{14}N spécifique de ces produits (MARIOTTI *et al.*, 1976).

Les marquages sont aussi expérimentaux ; ils peuvent porter sur des portions d'écosystèmes, telles les différentes strates de litière produite chaque année par leur séparation par des filets (RAPP, comm. pers.). Ils portent aussi sur des éléments chimiques dans les holocénoses, tel le marquage au Césium-137 d'une formation arborée à *Liriodendron* pratiquée à Oak Ridge (AUERBACH *et al.*, 1964). Il a trait à des organismes repérés par divers moyens (coloration, amputation, étiquetage, baguage, ...) permettant théoriquement de suivre à la fois les migrations et la démographie (notamment mortalité des classes d'âges marquées).

Le suivi des éléments chimiques, déjà signalé au niveau global d'une holocénose, est possible de façon plus restreintes au niveau de syntégon telle l'évolution d'une litière marquée ^{14}C (D1ETZ, 1979) (fig. 2-8, p. 138, 2-12, p. 149) ou le transfert d'azote *in situ* entre lombriciens et plantes (FERRIERE, 1986) (fig. 2-13, p. 150). Dans tous les cas, ce sont les variations temporelles des états marqués/non marqués des compartiments qui permettent de reconstituer les cinèses de départ et d'entrée vis-à-vis de ces compartiments.

La compartimentalisation peut être faite *a priori*, lorsque l'on croit connaître qualitativement l'orientation des transferts, mais elle est souvent effectuée *a posteriori* avec la découverte du devenir des éléments marqués. On emploie à cet égard le terme de traceurs pour les isotopes chimiques permettant un suivi "à la trace" d'un élément dans les systèmes étudiés (objet instable, p. 279).

4.3. Le prélévât

4.3.1. Notion de prélévât

Le prélévât est un objet concret quelconque, donc une portion de l'espace-temps du champ écologique. Par relevé, prise ou/et interception, on obtient directement, ou au laboratoire, une (ou des) donnée(s) caractérisant la composition de cet objet qui est vis-à-vis de cette(s) caractéristique(s) insécable ; pour un même prélévât chaque donnée est de nature (caractéristique) différente. Réciproquement, le prélévât est l'objet concret ayant fourni pour chaque caractéristique une DIC et une seule.

Le prélévât est défini d'abord par l'information écologique (la ou les DICs) qu'il fournit et est limité dans l'espace-temps par ses cotes (ses dimensions temporospatiales). C'est l'objet du champ écologique auquel la donnée est liée. Il est dans l'écosphère la limite temporospatiale inférieure de l'analyse (la portion la plus fine) vis-à-vis des deux référendaires espace et temps. C'est, le "grain" le plus fin de l'information disponible sur cette portion d'espace-temps. Le choix des cotes est donc une option limitant les futures interprétations.

Pour le troisième référendaire, la composition, le prélévât peut fournir plusieurs données mais chacune appartenant à une caractéristique différente. Par exemple, une même prise de sol peut donner un pH, un dénombrement des acariens oribatides *Oppia minus*, un nombre total d'Enchytraeidae, un taux de carbone, une proportion de ^{15}N dans l'azote du prélévât, son propre volume, ...

Les données sont toujours liées à un prélévât ayant potentiellement des cotes temporospatiales. Dans l'absolu, la forme (espace) et les dimensions associées à cette forme font partie des caractéristiques (cotes spatiales) liées aux autres données du prélévât. Le temps de début de collecte et celui de fin permettent de situer temporel le me ni le prélévât par la date (par exemple dans les jours du calendrier) et sa durée (par exemple de 6h 30 à 7h 10 — 40 mn). Le prélévât porte donc sur les trois référendaires (p. 37) du champ écologique : espace, temps et composition.

La notion de caractéristique n'implique pas qu'elle soit directement liée au prélévât (tel poids du prélévât, ou carbone total du prélévât). En général, elle sera au contraire un lien par enchaînement de caractéristiques du type : taux de ^{14}C , du carbone de l'individu 22, de la population *Lumbricus terrestris* de stade adulte, du peuplement de lombriciens, du prélévât 145. La caractéristique "taux de ^{14}C " est totalement décrite par cette chaîne d'autres (éventuelles) caractéristiques, tel le nombre d'individus, de la population de *Lumbricus terrestris*, du..., etc. Il n'y a en fait qu'une donnée quantitative, qualitative ou floue par caractéristique d'un prélévât... sa dénomination traduisant des liens avec d'autres caractéristiques.

Le prélévât est l'objet concret sur lequel on effectue une acquisition d'informations. Il n'est pas nécessairement le prélèvement physique de l'objet concret (par exemple dans les relevés, dans les mesures directes de cinèses d'un anémomètre, ...). C'est même parfois l'inverse : un apport dans le système écologique (c/. notamment actes, p. 275, ou encore un mésonéat, telle la pluie).

Le prélévât est donc lié à une acquisition d'informations traduites finalement sous forme de DICs. Ses caractéristiques temporospatiales, c'est-à-dire sa situation et ses cotes dans le champ écologique, le caractérisent.

Le prélévât étant la portion d'espace-temps permettant d'obtenir une donnée d'une caractéristique, ou plusieurs données de caractéristiques à chaque fois différentes, a une importance littéralement essentielle puisqu'il est la source de DICs. Derrière une apparente grande variété de "méthodes de prélèvement" il n'y a en fait qu'une opération : on acquiert l'information dans le champ écologique.

Ce concept joue un rôle clé en écologie opérationnelle. La donnée d'une caractéristique sera ensuite liée aux autres propriétés de son prélévât. Une

information (par exemple pH = 3) est indissociablement liée aux caractéristiques de son prélèvement (pH de quoi ?). La donnée, atome d'information, n'a de sens que grâce aux liens permis par le prélèvement.

Fondamentalement un prélèvement a les caractéristiques spatiotemporelles d'une portion du champ écologique dans lequel il est délimité par ses 4 cotes définissant son volume (x, y, z) et sa durée (d) auxquelles on peut lier les éléments étudiés de sa composition (nature des données issues de ce prélèvement).

Dans la pratique, ces cotes ne sont pas toujours précisées car négligées par les Options (p. 41, 267) qui limiteront les possibilités d'interprétation.

Le prélèvement peut être formé de sous-prélèvements. Dans un certain nombre de cas, les observateurs prennent plusieurs sous-prélèvements et les mélangent avant d'en exprimer les caractéristiques mêlées. C'est notamment le cas lorsque les moyens d'analyses font défaut et obligent à la médiation (p. 279) du milieu pour réduire le caractère ponctuel d'une valeur. Ce choix, très peu souhaitable, est un compromis introduisant un flou important sur la signification spatiotemporelle des données issues de tels prélèvements.

C'est aussi fréquemment le cas par défaut de gestion de l'information, lorsque les chercheurs confondant, au nom d'un échantillonnage finalisé, choix d'options, données et interprétation (p. 301), perdent l'information initiale et ne conservent que des informations ayant trait à des ensembles. Nous verrons (p. 305) que cette attitude, déclassant une information initialement acquise au rang de DICs de prélèvements à celui de prédonnées de sous-prélèvements, est l'un des gaspillages le plus important des pratiques agronomiques, écologiques et environnementales ... et est devenu actuellement totalement injustifiée (chap. V).

L'extraordinaire diversité apparente des procédures d'acquisition de données initiales aboutit à deux constats opposés :

1) On cherche abusivement à utiliser des données dans des ensembles auxquels elles n'appartiennent pas, en raison des cotes (x, y, z, d) ou de la situation (X, Y, Z, D) du prélèvement dans le champ écologique (p. 269) ou en raison du fait que les données de prélèvements hors champ écologique telles les DEPs (Ex. : Un débit gazeux mesuré au laboratoire, appliqué à une population d'un système écologique).

2) Au moment de la collecte des données, on a imposé des contraintes au prélèvement totalement inutiles pour l'interprétation ; pour le même effort d'acquisition, on a ainsi réduit l'information disponible {— la qualité de l'échantillon formé par l'ensemble considéré} par mauvaise(s) option(s) sur les prélèvements (p. 267).

1) et 2) peuvent aller jusqu'au constat de l'inutilité des données.

Présentement la non-réflexion sur le prélèvement, en tant que source de données, conduit très souvent à une perte d'information pure et simple (p. 300).

La définition des caractéristiques du prélèvement (= situation X, Y, Z, D et cotes x, y, z, d) est donc cruciale pour toute l'écologie car elle est une des limites essentielles à tout transfert, synthèse ou globalité de l'information.

4.3.2. Options chronologiques sur les prélèvements

Parmi les données d'un prélèvement, la cote durée (début, fin) permet un repérage pour les calculs de cinèse (p. 44). Dans la pratique, cette cote n'est pas nécessairement mesurée. C'est le cas des variables d'état des compartiments dont on considère que la modification temporelle au cours de la durée de collecte est négligeable : nous ne souhaitons connaître que l'état à "l'instant" de collecte. Exemples :

1) le taux de sable d'un sol ne se modifie pas au cours du prélèvement et de l'analyse d'une terre ;

- 2) une photographie permet ultérieurement un dénombrement de l'état "instantané" des éléphants d'une portion de savane, etc ;
- 3) constater qu'une parcelle est une prairie ne se modifie pas au cours du constat.

En fait, cette Option négligeant la durée est très fréquente dans les collectes sur les variables d'état : la durée du prélèvement est usuellement négligeable par rapport à la modification des états pris en compte durant cette durée, et les données issues d'un prélèvement sont alors considérées comme instantanées. Inversement, les données d'interception sont le résultat de phénomènes dépendant de la durée (d) : ici la connaissance des caractéristiques début-lin est essentielle. En conclusion toute donnée est associée à une date (D) (variables d'état et cinèse) et en outre toute cinèse est fonction de la durée (d) ; par contre, beaucoup d'états sont seulement considérés à l'instant où l'état est constaté.

La date est la situation temporelle du prélèvement et la durée, négligée ou non, sa cote temporelle.

4.3.3. Options spatiales : prélèvements euclidiens, cartésiens, informels et ponctuels

Les caractéristiques spatiales des prélèvements sont associées à toutes données écologiques.

Les prélèvements euclidiens sont usuellement cotés en volumes cubiques, parallélépipédiques, cylindriques..... Ils permettent, au moment des interprétations, des inférences (interpolations et extrapolations) à un espace euclidien de dimensions supérieures au prélèvement (par exemple, on interpole les dosages effectués sur 100 prélèvements, mesurant chacun 1 litre, au volume total d'un étang). Ils sont un élément des relevés destinés à échantillonner, par exemple, une parcelle ou une région.

Très souvent la cote "hauteur" des prélèvements, c'est-à-dire la composante verticale du champ écologique, est négligée car celle-ci est implicite. Les données sont alors exprimées en unité/surface (exemple : production de blé : 7 T/ha ; nombre d'animaux : 300 individus/ni²). Cette pratique est largement justifiée en raison du caractère essentiellement superficiel de l'écosphère dont la dimension verticale est souvent négligeable par rapport à sa surface : les transferts verticaux internes à une holocénose (p. 119) sont souvent explicités indépendamment (cf. p. 131, notion de pieu). De tels prélèvements, dont les données sont liées exclusivement à des cotes durée et horizontales, sont des prélèvements cartésiens.

Dans certains cas, les prélèvements sont linéaires : l'information n'est plus acquise que vis-à-vis d'un transect, les deux autres dimensions euclidiennes étant négligées (Ex : hauteur d'un arbre, en radiotrigonométrie longueur du déplacement d'un animal pendant la durée d, etc.).

Les prélèvements informels négligent tout à fait l'expression des cotes spatiales, ils sont notamment utilisés dans les études typologiques où la coexistence spatiale de caractéristiques différentes est seule prise en compte (intrapolation spatiale ponctuelle, p. 287). Ils tolèrent parfois une imprécision importante ; par exemple, il est possible de connaître l'existence de certaines espèces, difficiles à localiser par nos propres moyens, en analysant le régime alimentaire d'un prédateur facile à étudier avec des moyens spécifiques (cas d'oiseaux prédateurs sachant trouver certaines proies dans un paysage où l'on ne peut pas nous-mêmes localiser ces proies : LtBOIS, 1984a). Un individu est également un prélèvement lorsqu'il est source de DICs.

Les prélèvements cotés ont, par définition, une forme temporospatiale généralement simple (ligne, carré, rond) qui, une fois retenue dans un plan d'échantillonnage, ne varie souvent plus en raison du fait que la composition de la (des) caractéristique(s) observée(s) dans les prélèvements n'est pas indépendante des cotes de ce prélèvement et des pratiques techniques qui l'accompagnent (D.T.).

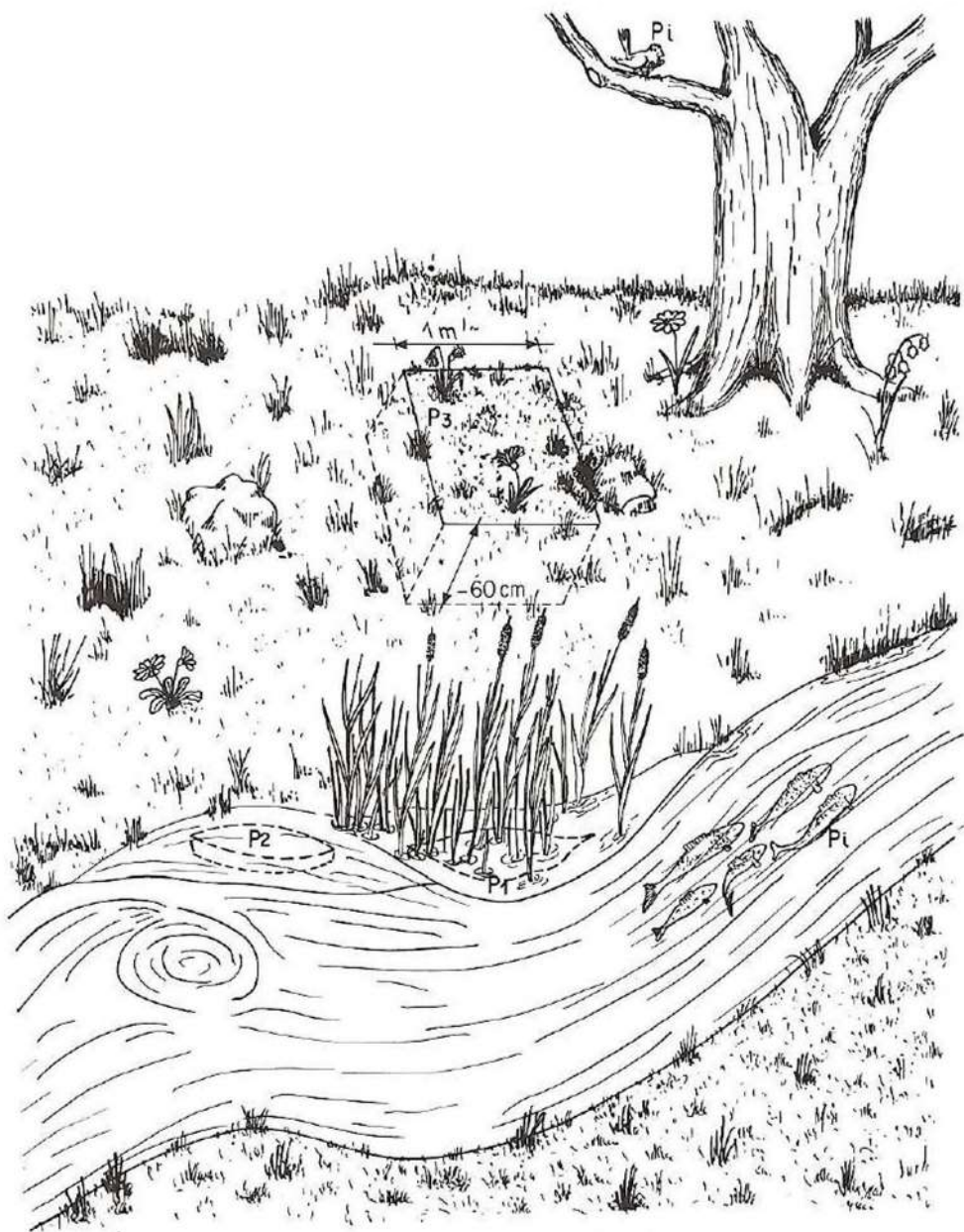


Figure 4-2 - Les cotes des prélèvais. Les prélèvais euclidiens ou cartésiens (P_3) sont inadéquats à la diversité structurale morphofonctionnelle de l'espace, prise en compte par des prélèvais informes (P_1 , P_2) ouïct aux cinèses propres aux prélèvais d'objets instables (P_i).

Le fait que le prélévât occupe nécessairement le volume (coté ou informe) ayant permis l'obtention de la (des) caractéristique(s) qui le justifie(nt) implique une médiation temporospatiale qui homogénéise l'hétérogénéité spatiotemporelle intra-prélévât ; cette médiation est variable car l'hétérogénéité varie elle-même (p. 280).

A l'inverse, un prélévât ponctuel peut être informe c'est-à-dire collecté sans forme fixée *a priori* dans les options d'échantillonnage (p. 437). Il est alors possible de respecter les "formes" que la nature a donnée au(x) caractéristique(s) observée(s), c'est-à-dire d'adapter le prélévât au terrain au cas par cas (fig. 4-2).

La qualité des données d'un prélévât ponctuel vis-à-vis de leurs liens aux autres caractéristiques est généralement meilleure si les prélévais sont informes. En conséquence les prélévais informes, ne permettant pas une interpolation numérique dans l'espace-temps, se prêtent par contre remarquablement aux typologies (p. 286) et aux comparaisons morphofonctionnelles (p. 367).

L'organisation d'une série de prélévais ponctuels, techniquement de nature différente mais caractérisant une même situation spatiale, accroît considérablement la somme des données analytiques caractérisant ce point. Le lien temporospatial des prélévais joue un rôle essentiel (au sens littéral) trop souvent perdu de vue. En écologie moderne, tant appliquée que fondamentale, la situation doit être impérativement conservée. Nous pouvons résumer au tableau 4-1 les qualifications relatives à l'expression temporospatiale des prélévais.

PRELEVAT	(X)TES				SITUATION				POUR INTERPRETATION
	x	y	z	d	X	Y	Z	1)	
euclidien	+	+	+	v	+	+	++		interpolations
cartésien	+	+	0	v	+	4-	0	+	interpolations horizon
linéaire	+	0	0	v	+	+	v	+	interpolations limitées
ponctuel	0	0	0	v	+	+	v	+	intrapolations, couvertures
informe	v	v	v	v	+	+	v	+	coexistence
instantané	v	v	v	0	+	4-	v	4-	d'état
interception	v	v	v	+	+	—	v	+	de cinèse
d'objet instable	v	v	v	v	d	d	d	+	stéréoch ioniques
d'objet stable	v	v	v	v	+	+	v	+	diachroniques

Tableau 4-1 - Les divers qualificatifs des prélévats en fonction de leurs cotes et Situations, + préalablement fixées, 0 négligées, d : à situation variant diachroniquement, v : variables en fonction d'autres qualificatifs précisant un prélévât (un prélévât peut être euclidien et stable ou une interception stable et euclidienne) ... Les données issues des prélévats se prêtent, ou non, à la constitution d'ensembles permettant certains types d'interprétations (voir aussi p. 280 à 282).

Il n'y a pas de contradiction logique à ce qu'un prélévât soit euclidien et soit collecté pour une intrapolation ponctuelle. Toutefois les deux approches ayant chacune leurs contraintes, il est fréquent de voir qu'à vouloir obtenir simultanément les deux propriétés, il y a défaut de qualité des données (mauvaise liaison au point ou/et échantillon extrapolable trop pauvre ou inadéquat) (voir ci-dessous).

4.3.4. Composition, médiation et métrique dans le champ écologique

La définition des cotes du prélèvement, abordée aux paragraphes précédents, est logiquement distincte mais concrètement indissociable de l'analyse de la composition du prélèvement car les choix méthodologiques d'observations rendent possibles (ou non) certaines interprétations.

En raison des moyens, toujours limitants dans l'absolu, les options portent sur la nature des analyses (coût) mais aussi sur leur fréquence. Certaines analyses sont destructrices du prélèvement et interdisent ensuite d'autres études sur celui-ci.

L'analyse porte sur une portion d'espace-temps prise globalement : le prélèvement qui est la portion la plus fine de champ écologique que l'on a choisi d'étudier. Cette option est une limite aux futures interprétations (limite temporospatiale inférieure). La donnée décrit toujours globalement l'ensemble du prélèvement ; elle est une "moyenne" au sens intuitif (non mathématique) parfois au sens mathématique (s'il y a des prédonnées : répétition de la même mesure sur le même prélèvement). Cette "moyenne" est la médiation temporospatiale (BOUCHE, 1975) de la caractéristique analysée conduisant à une donnée quelle que soit la complexité interne du prélèvement quelle "homogénéise" par sa mesure globale.

Nous devons ici revenir sur une propriété importante du prélèvement : par définition, il ne permet de fournir qu'une DIC par caractéristique mais peut fournir une infinité de données de caractéristiques différentes.

Cette propriété est très importante dans le cas d'études portant sur la co-existence de caractéristiques. Dans un même prélèvement coexistent des caractéristiques très différentes (éléments chimiques, état oxydo-réducteur, enzymes, espèces vivantes, minéraux, gaz, morphologie, etc.).

Le prélèvement, ayant nécessairement un volume spatiotemporel, peut mêler, pour une caractéristique particulière, des valeurs fort contrastées mais confondues par médiation. C'est particulièrement le cas de sites pour partie solides (comme les organes vivants, le sol, etc.) où la structure solide, relativement stable dans le temps, peut, être très diversifiée pour certaines caractéristiques (pH, concentration en phosphore, etc.) dans de très petites portions temporospatiales du prélèvement.

Intuitivement, la meilleure coexistence (= co-occurrence spatiale) est établie lorsque l'on considère ce qui se passe en un point géométrique où toutes les caractéristiques sont effectivement liées en ce point. Mais un point, par définition géométrique, ne fournit, hors sa situation, aucune information : il faut nécessairement un objet ayant un "volume" spatiotemporel pour fournir des données : c'est-à-dire un lien lâche entre caractéristiques qui ne co-existent pas précisément au point.

On peut toutefois chercher à minimiser les inconvénients d'une prise, obligatoirement temporospatiale, pour l'information relative à sa composition en s'appuyant sur la morphologie du champ écologique considéré. Cela revient à définir le prélèvement d'après la morphologie naturelle en retenant une portion considérée comme "homogène" (en fait moins hétérogène que son mélange avec son entour, fig. 4-2). Ceci se fait spontanément ou plus difficilement selon l'intensité des discontinuités perceptibles.

L'homogénéité est rarissime et probablement n'existe pas en écologie. Il est toujours possible d'augmenter la résolution (la finesse d'observation) dans le Champ écologique et de découvrir les détails hétérogènes inférieurs à un niveau de perception initialement "homogène". Certes une portion d'espace écologique peut apparaître par rapport à une autre plus homogène, mais elle n'est jamais homogène ; il serait plus prudent de dire "moins hétérogène" : il y a dans l'usage du mot homogénéité une abstraction théorique très importante ayant un caractère arbitraire en écologie.

La recherche de l'"homogénéité" (sic) est toutefois une pratique fréquente qui est justifiée au sens d'une moins grande hétérogénéité. On cherche alors à obtenir la meilleure information possible en ne faisant pas disparaître par médiation spatiale dans les prélèvements les différentes valeurs des caractéristiques que l'on cherche à différencier entre prélèvements. Il s'agit de définir concrètement le prélèvement de façon

efficace, en optimisant la qualité des liens entre données (donc caractéristiques) d'un prélévât.

Exemple 1 : Prélèvement d'une branche pour analyse (et non d'un volume d't m³ contenant air, branche, feuilles et poussière).

Exemple 2 : Définition morphologique d'un horizon du sol (par exemple envahi par le chevelu racinaire) et non une couche de 10 cm.

Exemple 3 : Recherche d'un individu d'association végétale et mesure des caractéristiques mésologiques et cytologiques des végétaux dans le milieu de ci i individu d'association.

Dans ces trois cas, le prélévât est (ou les prélévais sont) défini(s) non pas par rapport à une forme géométrique simple (cylindre, parallélépipède, etc.) mais par rapport à la morphologie (fonctionnelle) du champ écologique (fig. 4-2).

Une telle attitude conduit souvent à des prélévats informes où la précision de la coexistence des caractéristiques est privilégiée sur celle d'une forme géométrique prédéterminée. Ce qui est parfaitement justifié si par exemple l'on cherche la coexistence fonctionnelle d'une caractéristique A (par exemple une plante) avec la caractéristique B (par exemple la concentration de sols en cuivre). L'objectif d'interprétation (p. 337) dicte l'option du prélévât.

Comme déjà indiqué ci-dessus (p. 279), l'adoption de plusieurs prélévats ponctuels informes emboîtés sur un point optimise le Processus Répétitif d'Accroissement des Connaissances de comparaison typologique.

A l'inverse si l'on a pour objectif d'utiliser les données issues des caractéristiques du prélévât pour des inférences euclidiennes, ceci implique que l'observation se rapporte à une métrique de l'espace (10 ml, 1 m², 1 cm³), pour permettre à la donnée issue d'un tel prélévât euclidien d'être interpolée avec d'autres données similaires, par exemple : 1) pour échantillonner un champ et exprimer une quantité à l'hectare ou 2) pour quantifier tous les deux jours le ¹⁵N restant dans une fraction de soi d'une parcelle de 10 m². C'est souvent le cas en systématique.

L'option du prélévât coté ne conduit pas à une contradiction mais très souvent à la fois permet et limite l'usage futur des DICs issues du prélévât. Un carré de 1 m² imposé, par exemple sur une placette, est très souvent arbitraire par rapport à sa structure naturelle (jamais quadrangulaire et métrique !). Inversement, l'adoption d'une démarche ponctuelle privilégiant les prélévats informes (par exemple, pour une étude de coexistence) interdit l'extrapolation quantitative euclidienne.

11 est remarquable que les conséquences de la médiation, distinctes entre prélévats euclidiens et prélévats ponctuels, n'ait pas été clairement développées dans les ouvrages d'écologie. Une très grande perte d'informations initiales en résulte par l'adoption d'un échantillonnage inadapté à un objectif ou par des faits maladroitement imprécis.

Ce qui est vrai de l'espace l'est du temps ; un état à une date donnée peut être pris sans sa cote durée (prélévât instantané, p. 276), par contre, toute cinèse oblige à connaître initialement celle-ci.

Dans certains cas, on s'intéresse d'abord à un objet "instable" c'est-à-dire mobile dans l'espace-temps (tels les oiseaux migrateurs) et certaines caractéristiques sont "d'abord" rattachées à ces "objets" : nombre d'adultes, sexe ratio, masse moyenne individuelle, taux de stérilité sexuelle, iode radioactif dans la thyroïde. Un prélévât étant simultanément défini par les trois référendaires porte sur un objet-espace-temps ; cet objet situé à un espace-temps subséquent (2 jours plus tard par exemple) est un nouveau prélévât du même objet. Nouveau, car sa situation temporo-spatiale a changé (voir l'association stéréochimique, ci-dessous).

Ces modalités "congénitales" au choix d'acquisition de données, car liées intimement à la définition du prélévât source des DICs de route interprétation, ne sont une difficulté méthodologique que dans le cas où elles ne sont pas explicitées (tableau 4-1). Faute d'être explicitées, il est très fréquent que l'on tende à interpréter des ensembles de données de façon inadéquate et réciproquement que l'on organise mal

les observations. La gestion moderne des données (en BDR, p. 317), obligeant à l'énoncé explicite des caractéristiques du prélèvement de chaque donnée, élimine cette ambiguïté mais oblige au langage univoque caractérisant ces modalités.

4.3.5. Associations de prélèvements (prélèvement associés et l'associateur)

Dans la saisie de l'information certains objets (— portion quelconque réelle du Champ écologique, p. 93) sont étudiés de façon répétitive : ils fournissent donc une série de prélèvements. Certaines caractéristiques relatives à ces objets sont toutefois invariantes et peuvent donc être décrites par un prélèvement tandis que d'autres, variables dans l'espace-temps, sont décrites par une série de prélèvements.

Le prélèvement résumant les caractéristiques considérées comme invariantes est le prélèvement associateur ; les prélèvements résumant les caractéristiques variables sont dits prélèvements associés.

Plusieurs séries différentes de prélèvements associés peuvent porter sur un même associateur. La relation entre associateur et associé est assurée à l'aide d'un identificateur (servant de clé en BDR, p. 328) commun à l'associateur et aux divers associés. Afin d'éviter toute redondance hormis le lien à l'associateur, seules les caractéristiques variables sont décrites ; elles forment entre elles des associations.

Ces associations de prélèvements sont de deux types :

1) L'association diachronique :

L'associateur est un prélèvement décrivant un objet fixé spatialement et comporte les caractéristiques temporellement constantes. Les caractéristiques variant dans le temps, et observées à partir de ce même objet, sont décrites par une ou plusieurs séries d'associés (= séries de prélèvements associés). Par exemple un plot peut être initialement défini par sa situation X, Y, Z et être décrit par un prélèvement indiquant en outre à la date D des caractéristiques considérées comme invariantes (taux d'argile du sol, orientation, pente, etc.) et l'identificateur. Ceci forme le prélèvement associateur auquel des séries de prélèvements associés peuvent être rapportées grâce à l'identificateur commun ; par exemple à une série de dates D₁, D₂, ..., D_n, la phonologie des végétaux de ce plot ou leur état sanitaire, etc. Une autre série diachronique peut décrire sur le même plot aux dates D_a, D_b, ... D_n les insectes homoptères présents, etc.

2) L'association stéréochronique ;

Dans ce cas l'objet est spatialement instable, tout déplacement demandant un temps, cette instabilité est spatiotemporelle.

L'associateur est un prélèvement qui, comme précédemment, a pour rôle de conserver l'information intangible. Par exemple pour un animal : espèce, race, données sur lignées parentales, sexe, etc., et l'identificateur. La série de prélèvements associés portera notamment sur les situations successives (incluant les dates et situations géodésiques) et d'éventuelles observations associées. Par exemple : notations sur un animal suivi spatiotemporellement par radiogoniométrie, nombre d'individus d'un troupeau ; poids vifs successifs d'un oiseau bague (portant le numéro identificateur), etc.

En conclusion, placerte, plot (mésos-, micros-, picro-plots) et objets instables seront souvent les associateurs auxquels sont liés des séries de prélèvements associés, diachroniques pour les premiers et stéréochroniques pour les objets instables.

L'organisation d'associations de prélèvements ayant leurs liens facilite la constitution d'ensembles de données que nous décrivons maintenant.

4.4. Les ensembles de données

4.4.1. Objectifs, ensembles et caractéristiques (fig. 4-3)

L'acquisition de données initiales est une analyse de l'objet d'étude écologique (milieu d'une espèce, caractéristiques d'un individu, composantes d'une holocénose, analyse spatiale, etc.). Le chercheur isole de l'écosphère des groupes d'informations d'une même "nature" (en fait des données propres à une caractéristique) : valeurs de pH, étapes de la croissance d'une plante, présence d'une espèce, apports d'engrais, etc.

En écologie analytique, cette démarche s'arrête toujours à un niveau qui pourrait être subdivisé en éléments encore plus analytiques. Ainsi certaines études vont dénombrer les vers de terre, d'autres vont compter chaque espèce de vers de terre, d'autres vont enregistrer chaque stade (adultes, juvéniles, cocons, etc.) de chaque espèce de lombriciens, d'autres vont faire trois lots de poids pour chaque individu de chaque stade de chaque espèce de lombriciens, d'autres vont faire 5, 7... n lots, ou analyser la structure morphologique ou la composition chimique des individus, etc.

En pratique, les moyens disponibles et les options sur objectifs dictent le niveau analytique dans la globalyse (p. 437) et en définitive on doit préciser la liste des caractéristiques observées, par exemple :

- température maximale journalière
- température minimale journalière
- pH du sol
- présence/absence de *Dactylis glomerata*
- masse de l'animal au garrot
- carbone total du sol
- vitesse du courant de l'eau
- orientation du vent...

En général, une caractéristique sera l'objet de plusieurs observations instantanées comparables dans l'espace (données synchroniques) ou/et dans le temps (données diachroniques), parfois un seul état considéré comme constant est enregistré (présence d'une espèce d'arbres comme caractéristique du milieu où se situe une étude plus détaillée) enfin souvent, et c'est normal, les données de composition sont stéréochroniques. Chaque caractéristique donne à chaque observation une donnée et les données peuvent être organisées en ensembles de 1 à n données.

Comme nous l'avons vu plus haut (p. 265), une donnée n'a isolément aucun sens et elle se réfère nécessairement à quelque chose, par des liens. Le premier d'entre eux est la "caractéristique" ; les données sont regroupées vis-à-vis de cette caractéristique-dénomination. Une dénomination peut recouvrir, par exemple pour le pH, diverses modalités de mesures ; la caractéristique est simultanément nommée et décrite au plan des modalités techniques d'acquisition (D.T.).

Ces ensembles entrent eux-mêmes dans des ensembles de niveau hiérarchique supérieur.... etc. En fait, toute caractéristique décrit un état d'un compartiment ou une cinèse entre compartiments d'un système. De très nombreux malentendus résultent de la mauvaise perception d'un ensemble de données, de sa signification interne, de sa limite informative, de son aptitude (ou inaptitude) à entrer dans des ensembles de complexité supérieure et à l'inverse de sa valeur globale recouvrant des ensembles perceptibles à un niveau analytique inférieur (perception plus analytique).

Chaque donnée écologique doit être reliée par des liens à d'autres données elles-mêmes DICs du champ écologique et résulte d'un choix d'acquisition dans ce champ : elle est une partie de la globalyse effectuée sur ce champ et est une information sur l'écosphère utilisable pour sa valeur intrinsèque et pour la possibilité d'être incluse en des ensembles plus vastes pour interprétation.

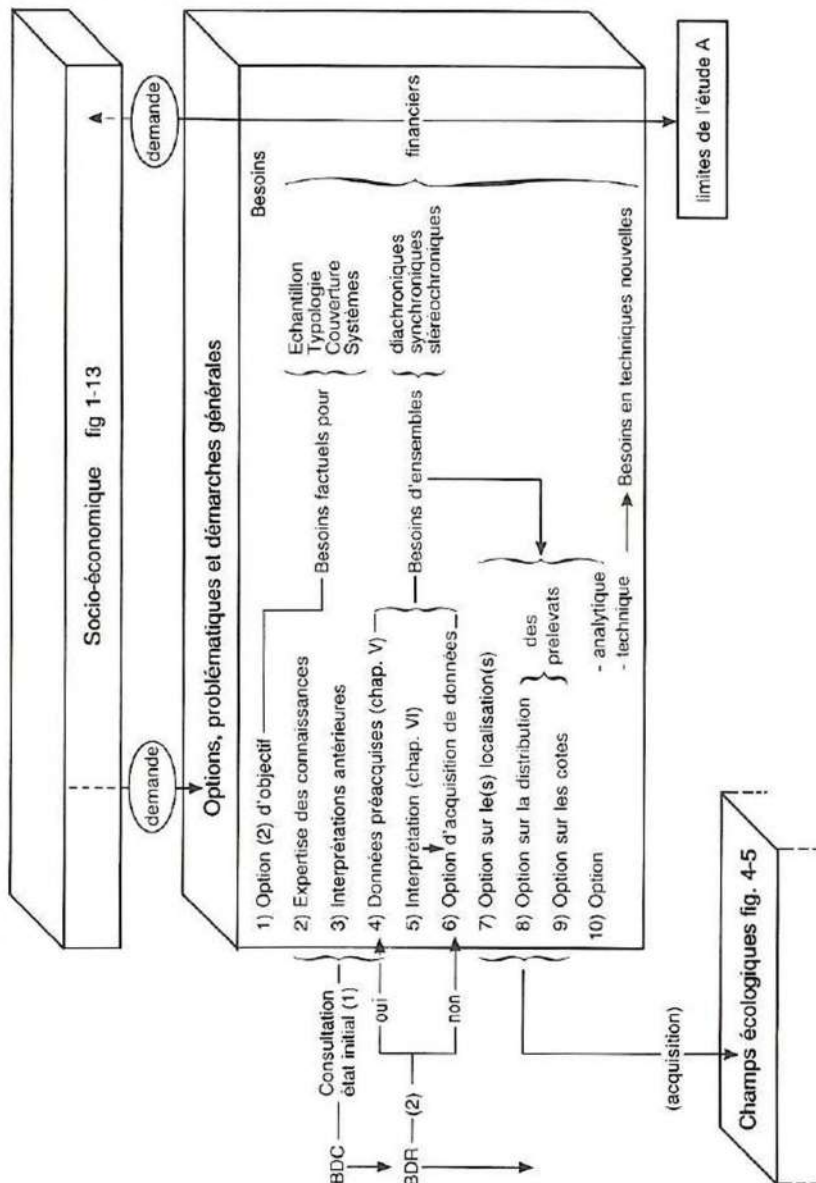


Figure 4-3 - Problématique, démarches initiales et définition de diverses options ; liens entre l'état des connaissances, y compris pré-existantes (1) et données pré-acquises (2).

Cette dernière possibilité n'est concrètement réalisée qu'*a posteriori*, après gestion des données (chap. V) et (ablation pour constitution d'ensembles (p. 359) à interpréter (chap. VI).

Les données peuvent résulter d'observations accidentelles (observation d'un évènement rare) et sont alors des données fortuites dont l'importance est loin d'être négligeable. Celles-ci doivent être, et peuvent effectivement être, gérées sans problèmes spécifiques dans des Bases de Données Relationnelles (p. 319). La plupart du temps, la donnée est acquise après un choix conscient d'acquisition résultant d'un objectif d'étude. Ces objectifs peuvent être guidés par trois options spatiotemporelles et quatre options pré-interprétatives.

4.4.2. Options sur les ensembles

1. Options spatiotemporelles

- Un ensemble est synchronique lorsque les données de celui-ci sont considérées comme ayant été prises simultanément (les différences de dates étant jugées négligeables) (ex : ensemble des profils de sol utilisés pour constituer une carte pédologique).

- Un ensemble est diachronique lorsque les données de celui-ci sont organisées pour refléter des différences chronologiques (ex : variations horaires du dégagement de CO₂ d'un sol ; nombre de pucerons/m² observé chaque semaine).

- Un ensemble est stéréochronique lorsque les données de celui-ci sont organisées pour tenir compte de la situation totale des données, à la fois dans l'espace et le temps, (exemple : étude d'une migration saisonnière, modèle écologique complet d'une caractéristique analysée, fig. 1-12, p. 99).

2. Options pré-interprétatives

Lorsque l'on s'assigne un objectif de recherche précis, on s'efforce de réunir des données écologiques objectives (DICs) pour satisfaire au mieux cet objectif, soit à partir de données pré-existantes en Base de Données Relationnelles, soit classiquement, en effectuant une acquisition de données nouvelles dont on choisit (options) les modalités pour atteindre cet objectif spécifique. L'optimisation de celle acquisition se juge en comparant l'ensemble acquis à l'objectif assigné. Quatre catégories d'objectifs, nullement exclusifs l'un de l'autre, peuvent être reconnues : l'échantillon, la typologie, la couverture et la systémique.

A) L'échantillon : ensemble à extrapoler

On dénomme échantillon un ensemble de données susceptibles de représenter un tout. Les prélèvements sont alors choisis en fonction d'un plan d'échantillonnage visant à tirer de ceux-ci, par inférence des données, une description par DSEs d'un objet plus vaste (un tout) que les DICs elles-mêmes.

La signification (la qualité) de l'échantillon par rapport au tout que l'on cherche à connaître est une préoccupation ancienne traitée classiquement en terme de probabilité. Un ensemble de *n* données d'une caractéristique (= échantillon) issu d'un ensemble de *N* prélèvements est jugé représentatif d'un tout par le calcul du gain d'informations résultant de l'ajout de nouvelles données de la même caractéristique issue du même tout. Si l'on cherche une différence entre deux tout(s) (par exemple, dans les essais classiques témoin/traité) on teste les différences observées par rapport aux différences qui seraient dues à un pur hasard (aléatoire).

Les divers plans d'échantillonnage sont donc des compromis entre les probabilités d'imprécisions observées et les limites en moyens d'obtention de données. La gestion fluide de l'information (p. 315, 435) permet souvent, en fusionnant des

ensembles de données au moment de l'interprétation, d'améliorer la qualité des ensembles de données (échantillons) pour certains objectifs de recherche.

En fait, la notion de plan d'échantillonnage n'a d'intérêt pratique pour l'acquisition des données que lors de premières acquisitions de données effectuées pour une interprétation séquentielle focalisée (p. 301) qui justifie cette acquisition initiale. Ensuite, les manipulations en Base de Données Relationnelles conduisent à fusionner les données dans divers assemblages et allotements au stade de l'interprétation. Cette interprétation peut faire apparaître éventuellement la nécessité de nouvelles acquisitions (p. 445) pour améliorer un échantillon particulier.

Les données d'un échantillon sont destinées, par inférence, à être interpolées (étude des caractéristiques de l'échantillon, dont la moyenne d'un ensemble et son écart-type) puis extrapolées au tout. La moyenne est considérée comme représentative du tout, avec éventuellement un seuil de sécurité par rapport à une distribution aléatoire d'un échantillon théorique : exemple il y a 2215,6 kg/ha de parties aériennes des végétaux ; rendement du blé (en grain) est de $7\,200 \pm 600$ kg/ha.

Une donnée d'un échantillon est alors destinée à être un élément d'un ensemble général dont on recherche le trait moyen. Sa valeur n'est qu'un cas particulier d'un objectif général : l'information est destinée à être interpolée entre données de la même caractéristique. Par exemple, le nombre moyen de *Nicodrilus longus* adultes capturés à Cîteaux est de 9,07/m², l'échantillon ayant été constitué de 672 prélèvements (technique formol). Chaque prélèvement est défini (= coté) d'abord pour fournir des données extrapolables : l'information acquise dans un cas particulier de l'espace-temps est extrapolée à une portion plus vaste de l'espace temps (ici 2,6 ha/3 ans).

Un prélèvement constitutif d'un échantillon d'une caractéristique quantitative a nécessairement une métrique de ses cotes (espace-temps) permettant d'inférer la moyenne de cette caractéristique à un espace-temps plus important (l'interpolation entre prélèvement étant, à partir de ces prélèvements, une extrapolation). Cette nécessité d'une métrique des cotes est une contrainte qui n'existe pas pour d'autres options pré-interprétatives. J'ai appelé précédemment ces prélèvements "stationnels" en raison de leur utilisation pour au moins une station écologique (BOUCHE, 1975) (tableau 1-1, p. 34). En raison du sens trop restrictif de ce qualificatif et de confusions possibles, je préfère dire aujourd'hui prélèvements euclidiens ou cartésiens (p. 277).

Au moment de l'acquisition de données pour un objectif de recherche, on cherche parfois à distinguer des groupes de données en sous-ensembles, qui, par une ou plusieurs caractéristique(s), ont plus de différences entre ces sous-ensembles qu'à l'intérieur de chacun des sous-ensembles. Cet échantillonnage organisé est à la fois tendancieux et parfaitement justifié en de nombreux cas (appliqués notamment). C'est tendancieux, s'il s'agit de ne pas montrer que les différences observées relèvent d'options réductionnistes (pré-sélection d'une caractéristique sans vue d'ensemble) ; c'est efficace, s'il s'agit de montrer la validité des différences résultant d'un choix exprimé (pré-sélection effectuée en vue d'une réponse à une demande socio-économique, par exemple, l'effet d'un déboisement).

Tout classement de sous-ensembles en fonction de similitudes, soit *a priori* à la suite de la stratification (= organisation) de l'échantillonnage, soit *a posteriori* au moment du traitement des données issues de l'étude des caractéristiques des prélèvements, se fait en fonction de choix qui doivent être impérativement explicités (p. 357). En tout état de cause, il y a souvent intérêt à classer les similitudes des ensembles de prélèvements indépendamment des suppositions ayant présidé à la stratification des ensembles de prélèvements.

B) La typologie : ensembles sur points à comparer

L'objectif est ici de comparer les points entre eux d'après les données de chacune de leurs caractéristiques et d'étudier la coexistence de ces caractéristiques en dégagant des concepts plus synthétiques ou types.

Chaque point est caractérisé par une ou plusieurs donnée(s), les données ayant été intrapolées à un point spatiotemporellement commun aux prélèvements ayant servi à la collecte des données. Dans l'intropolation on attribue à ce point la donnée de chaque caractéristique, acquise nécessairement dans le volume du prélèvement par médiation (pH du soi, présence de telle espèce, nombre d'individus au m²). Les données sont par définition spatialement corrélées au point. De tels prélèvements destinés à être au moins dans un premier temps intrapolés sont dits prélèvements ponctuels (p. 279).

Notons que cette démarche d'intrapolation ponctuelle est très fréquente. Elle est souvent à l'origine de données quantitatives ou/et qualitatives qui serviront à une classification, illustrée par exemple par un dendrogramme. Des points étudiés sont regroupés en types découlant de l'interprétation synthétique des caractéristiques objectives.

De telles données ponctuelles dont les caractéristiques sont liées par leur situation, ou par prélèvement informel (caractéristiques d'un individu par exemple), peuvent être aisément interprétées par les statistiques descriptives (p. 367).

Ajoutons à cela que les caractéristiques observées en un point décrivent pour partie les composantes du système écologique propres à ce point. Les composantes systémiques étant interdépendantes dans le champ écologique, cette série de caractéristiques peut permettre, si elle est suffisante, de comparer les systèmes à l'aide de la typologie de leurs caractéristiques ponctuelles (p. 426).

C) La couverture. : ensemble décrivant le spatiotemporel

Elle est constituée d'un ensemble de points appartenant à un volume perçu superficiellement (surface) d'après un critère d'observation (observation de paysage, observation de photographies aériennes). Cette surface précise est une aire. L'ensemble des points d'une aire constituent la signature de l'aire. L'objectif est ici de caractériser l'aire dans son ensemble sans en effectuer l'analyse intrinsèque. L'aire est caractérisée par une série de données n'apportant chacun qu'une caractéristique, sans faire nécessairement l'objet d'une intrapolation comme en 2) ou d'une interpolation comme en 1).

On peut toutefois s'assigner une analyse des données couvrant cette aire pour en faire une typologie puis, moyennant une classification décisionnelle (p. 388) et un krigeage (p. 382), justifier des aires fondées sur des interprétations préalables (Ex : après définition des multiples critères des sols andiques, en faire la cartographie en s'aidant sur des photos aériennes ou satellitaires).

D) La systémique : l'objectif global

On peut donc chercher à acquérir des caractéristiques pour des données synchroniques et diachroniques permettant à celles-ci de constituer un échantillon, de participer à une typologie, de contribuer à une couverture. Elles peuvent encore contribuer à la reconstitution des systèmes écologiques dont elles sont composantes d'état ou de cinèse. On peut donc acquérir des données en privilégiant leur rôle pour effectuer un échantillon représentatif d'un Tout fonctionnel. On doit alors décrire des systèmes (en modèles) en étudiant les composantes (compartiments et cinèses) connectés de ces systèmes. Ces systèmes peuvent, être considérés dans des aires de façon statique ou comme composantes systémiques diachroniques prenant en compte les transformations (p. 46) des systèmes étudiés et les cinèses conduisant à ces transformations (p. 390). Enfin, les études systémiques étant les plus lourdes, la sélection des systèmes écologiques étudiés peut s'appuyer sur des points-systèmes optimaux grâce à la typologie (p. 347, 426).

4.4.3. Options et contraintes d'acquisition

Les quatre options pré-interprétatives d'acquisition de données ne sont pas incompatibles entre elles mais l'addition de toute option à une autre constitue en général une contrainte supplémentaire dans l'acquisition des données. Les moyens disponibles obligent nécessairement à restreindre ces choix.

Il est aujourd'hui possible d'explicitier totalement ces choix (p. 434) pour optimiser au mieux le traitement des données contribuant à atteindre un objectif précis, tout en permettant ultérieurement la réutilisation des données pour une connaissance écologique de plus en plus synthétique.

En effet, un échantillon oblige à des prélèvements euclidiens (en nombre suffisant pour permettre leur interpolation) et les données doivent être synchroniques, ou alors être beaucoup plus nombreuses, pour que l'étude des variations temporelles puisse être conduite ; cela oblige alors à un ensemble de prélèvements euclidiens stéréochroniques.

Une typologie n'oblige pas à des prélèvements euclidiens ; les prélèvements informés conviennent. Elle oblige par contre à une corrélation spatiale effective pour l'intrapolation ponctuelle de données de nature différente. Ici encore il faut en général que les données soient synchroniques... ou augmenter l'importance du travail. La typologie n'ayant pour objectif que de caractériser des types n'offre pas de contraintes *per se* sur le nombre de points.

Les ensembles de données pour signature de couverture doivent également être au moins synchroniques et suffisamment peu variables pour que leurs caractéristiques communes reflètent le tout (tests de similitudes, tests de différences entre signatures différentes, etc.), les données pouvant être euclidiennes ou non.

Par définition les ensembles diachroniques impliquent des séries de données ; leur extension à des ensembles spatiaux (échantillon, ensemble de points, signature) est particulièrement difficile : ce problème se pose avec acuité en écologie fonctionnelle.

Les données diachroniques peuvent, même si ce sont des caractéristiques d'état (p. 44), être organisées pour fournir une description de la transformation d'un lieu voire permettre, dans certaines conditions de marquage, un calcul de cinèses (p. 412). Ici encore les objectifs poursuivis *a priori* dictent les options de constitution d'ensembles.

Enfin l'objectif ultime - la compréhension des systèmes écologiques - oblige à une acquisition de données ayant l'ensemble des propriétés décrites ci-dessus. De plus il est nécessaire que la connexité systémique des composantes soit assurée, (le point est important et difficile mais il est possible d'organiser ces opérations de façon sélective (p. 95, 405, 426).

Dans tous les cas le choix d'objectifs d'acquisition se fait en fonction d'une finalité qui devrait être explicite (= motivation, p. 296, fig. 4-6). Toutefois, la gestion d'information moderne permet ultérieurement, en remplaçant ces données particulières dans des ensembles plus vastes et d'outrepasser ces objectifs initiaux (p. 334).

4.4.4. Qualité des données et des ensembles : les erreurs

La donnée peut être de qualité très inégale par rapport à divers points de vue ; elle a intrinsèquement une qualité qui peut être définie par rapport à trois critères : adéquation, précision et médiation. Elle peut extrinsèquement être appréciée par rapport à l'ensemble auquel elle appartient. Elle peut enfin être évaluée lors des interprétations (p. 348, 443).

1. Qualités intrinsèques des données

L'adéquation d'une donnée est la qualité de son lien effectif à la caractéristique d'attribution. Une donnée est adéquate lorsque sa mesure ou son observation permettent bien le(s) lien(s) que l'on entend en faire. Ex : la couleur d'une feuille de hêtre doit bien se rapporter à l'ensemble des couleurs, à feuille et à hêtre (et non par erreur à un poids, une branche et à un orme). Ex : l'incorporation du carbone dans un sol doit correspondre au carbone entrant dans le compartiment "sol" à l'instant t_1 et non pas être le bilan positif de C entre Q_1 et Q_2 (car entre Q_1 et t_2 il peut y avoir eu aussi "sortie"), etc. En d'autres termes, une donnée est inadéquate lorsqu'elle ne se rapporte pas à la caractéristique à laquelle on l'attribue.

La précision porte sur la classique "erreur de mesure" de physique, c'est-à-dire porte sur des données quantitatives (Ex. : 2,5 m + ou - 1 mm), en raison de l'imprécision des moyens techniques de mesure, ou des données qualitatives (Ex : *Lumbricus rubellus* subsp ?) en raison de la carence des moyens d'analyse. La précision n'est pas toujours explicitement décrite mais implicitement relevée par exemple sur la dernière décimale choisie (Ex. : 2 514 mm implique une erreur < 1 mm) ou de l'expression qualitative (Ex. *Lumbricus rubellus* subsp ?). Elle peut être explicitement indiquée et liée à la donnée, notamment lorsque cette donnée est enregistrée de façon apparemment plus précise que la précision effective (Ex : la situation. Latitude Longitude, d'un prélèvement arbitrairement attribué au centre d'un village car on ne connaît que le nom de la commune ; 253 cm + ou - 5 cm, etc.).

La médiation : c'est le résultat de la lecture globale du prélèvement. Ex : 28 *Oppia minus*, ou 25 ppm de Cd, dans un prélèvement de 100 g de sol peuvent provenir respectivement, d'une agrégation de la population sur 2 g de sol, ou de la concentration dans un microsite d'un cristal contenant 25 mg... dans l'ensemble des 100 g de prélèvement. Les cotes du prélèvement associé à la donnée donnent l'ampleur de cette médiation qui "efface ces détails" (p. 280).

L'aberration enfin est une donnée proprement anormale, obtenue par un dérèglement évident dans l'acquisition (à commencer par un *lapsus*).

2. Qualités extrinsèques des données (dans leur ensemble)

La qualité des données peut encore être jugée d'après le résultat d'une interprétation, après constitution d'un ensemble de données. Une donnée est alors jugée comme cas particulier de cet ensemble. On considère alors sa position relative dans la dispersion des valeurs de l'ensemble soit un écart à la moyenne de l'ensemble contribuant à la relative hétérogénéité de cet ensemble (p. 387). Elle peut également être considérée en cas d'interpolations sous l'angle de sa portée, c'est-à-dire du volume temporo-spatial qui, après analyse de l'ensemble, lui est attribué par inférence (p. 384).

Une donnée peut enfin ne pas avoir été acquise mais être arbitrairement introduite dans la globalyse par supposition ce qui doit être toujours explicité par un indicateur complémentaire (p. 345) en raison du risque pris.

Si chaque donnée est une partie d'ensembles et est d'une qualité appréciable, elle est nécessairement un atome d'information du champ écologique (p. 35) dans lequel elle doit être située pour devenir totalement explicite (p. 296), ce qui est rarement fait sans confusion en raison du caractère à la fois hétérogène et en continuum de ce champ (p. 35). Le lien aux trois référendaires sera donc une qualité essentielle.

4.5. La saisie des données initiales

4.5.1. La saisie

Comme nous l'avons vu, les prélèvements sont susceptibles de fournir des données sur un très grand nombre de caractéristiques du champ écologique. Par nature ces caractéristiques sont repérables dans le champ écologique.

Nous avons vu également que ces données sont liées entre elles spatiotemporellement par le prélèvement lui-même (p. 275) voire une imbrication de prélèvements ponctuels (p. 277) et que, parmi les caractéristiques d'un prélèvement, les cotes temporelles (p. 276) et spatiales (p. 277) peuvent être essentielles.

Pour des raisons techniques, les données sont analysées jusqu'à un certain niveau qui peut être explicite (une espèce, une variété, une classe de granulométrie) ou implicite (une longueur en décimètre).

La saisie des données dévia toujours se faire selon la précision la plus fine acquise, même si l'objectif initial de la recherche ne le requière pas. A partir du moment qu'un niveau précis de connaissances est atteint, il faut éviter de le perdre car les données n'ont pas une destinée mono-interprétative (p. 334). C'est après saisie et après gestion des données que, si nécessaire, on écartera sans élimination, l'information "inutilement" précise pour une interprétation spécifique.

En effet, les données ne sont pas uniquement utilisables dans le seul cadre initial ayant motivé leur acquisition. Leur gestion en Bases de Données Relationnelles (p. 321) et leur usage par Intelligence Artificielle en écologie (p. 101) peuvent requérir une précision imprévisible : les données sont multi-interprétatives.

La réciproque n'est pas vraie. S'imposer la contrainte d'une grande précision sans justification explicite serait une option maladroite freinant l'acquisition des données sans certitude de la moindre utilité. A l'inverse, s'épuiser avec un matériel sophistiqué à lire au centième d'unité doit être justifié.

L'adoption de codes restreignant l'information initialement acquise est aujourd'hui injustifiée et nuisible (p. 268).

La règle est donc de bien associer la saisie de données au niveau d'analyse le plus précis, initialement justifié et rien de plus. Il faut conserver précieusement les DICs comme l'information, la plus objective, ce qui est aujourd'hui économiquement et scientifiquement justifié, car jamais cette donnée ne se reproduira spatiotemporellement dans le système écologique qui "évolue" (se transforme).

Les données initiales doivent subir avant leur enregistrement définitif un ou plusieurs contrôles. Ceux-ci peuvent révéler des carences techniques et conceptuelles et doivent être inscrits en routine avant l'enregistrement définitif de Données Initiales Contrôlées.

La saisie manuelle ou automatique des données dépend du contexte matériel et informatique réalisable au niveau de la collecte, dont l'analyse des prises. Les techniques à cet égard évoluent beaucoup et dépendent du contexte technique, fort différent par exemple en télédétection où la saisie des données est considérable et quasi simultanée avec les relevés et le travail fastidieux d'un dépouillement de microarthropodes d'une prise de sol (pour la discussion de quelques-uns de ces aspects voir ZINNEL et MAROSAS, 1986).

4.5.2. Les données provisoires avant saisie

La donnée initiale acquise à partir d'un prélèvement est la donnée initiale brute. Les données brutes ont des aberrations techniques (erreurs de touches au moment du relevé, *lapses* intellectuel de l'analyste écrivant L alors qu'il pense K, erreurs par-défaillance d'appareillage).

Il y a aussi des insuffisances techniques temporaires : au cours d'un processus analytique, le maximum de précision ne peut être en toute certitude acquis qu'après l'obtention de premiers résultats. Par exemple, lors de la détermination taxonomique de 10 000 lombriciens d'un peuplement, l'identificateur observe sur les premiers individus des formes juvéniles de *Lumbricus* épianéciques (il est impossible de connaître l'espèce, ces juvéniles n'ayant pas les caractères permettant une identification spécifique). Les épianéciques constituent une catégorie écologique dont la "niche" (la place) n'est occupée usuellement que par une seule espèce. L'observation ultérieure au cours du dépouillement de *Lumbricus* épianéciques adultes permet de connaître l'espèce attribuable à ces juvéniles. Au cours du dépouillement la détermination réitérée des adultes confirme l'unicité de l'espèce d'attribution dans le site étudié et la détermination de *Lumbricus* épianéciques juvéniles devient possible au niveau subsppécifique et variétale par inférence des adultes aux juvéniles. Dans ces cas, les données brutes doivent être corrigées pour obtenir les DICs (Données Initiales Corrigées), seules enregistrées en définitive.

4.5.3. Le cas des données continues

D'une façon générale, les options d'analyse délimitent des données discontinues dans le champ écologique. Ces données initiales, après correction des erreurs, donnent des DICs discontinues entre elles en compatibilité avec la structure de l'information en ordinateur (en bits).

Les données analogiques (enregistrement en continu dans le temps ou l'espace, tel celui d'un anémomètre, de débitmètre, de thermomètre, de contours sur photographie, ...) sont non compatibles et obligent de toute manière à une perte d'information par lecture discontinue selon un pas arbitraire (en général choisi comme optimal ou suffisant vis-à-vis de l'objectif d'interprétation). Dans ce cas les DICs représentent une information appauvrie par rapport à l'information enregistrée. Celle-ci peut être conservée hors-saisie informatisée, en collection.

Notons que les développements des mémoires informatiques permettent à un coût perpétuellement décroissant des enregistrements "quasi analogiques" de données discontinues et leur transmission numérique en réseaux intégrés.

4.5.4. Collections et enregistrements (données non saisies)

Le processus d'acquisition de données peut conduire à conserver des objets matériels porteurs d'informations potentielles inexploitées... c'est-à-dire ceux dont on sait que l'on pourra ultérieurement extraire des données qui n'ont pas été initialement observées faute de moyens d'analyse des prises.

Il peut s'agir d'exemplaires d'un musée dont la conservation permettra de revenir à leur étude pour de nouvelles acquisitions de données (telle la révision d'un type). Il peut s'agir d'enregistrements analogiques à une ou n dimensions (photographie, film, bande multicanal de télédétection, ...) dont on a dû pour une première saisie choisir des cotes de prélèvements, telles la durée ou le pas (portée) de temps (p. 283). Ces cotes peuvent ultérieurement ne pas s'avérer optimales.

Les prises analogiques brutes continues doivent aussi être transformées en données numériques discontinues. Le prélèvement n'est défini ici, quant à sa cote durée, qu'après enregistrement technique mais avant la saisie informatique ; l'enregistrement initial peut être conservé pour une redéfinition de la durée du prélèvement.

Les Bases de Données peuvent suppléer partiellement à cette carence des données discontinues en indiquant l'adresse où les enregistrements analogiques continus sont conservés. Les données initiales brutes sont à conserver en collections (d'insectes, d'enregistrements analogiques, en herbiers, ...).

4.6. Les liens entre données

4.6.1. L'organisation des données

L'écologie, par définition globale, aborde un nombre énorme de problèmes fondamentaux ou/et appliqués. Ses pratiques sont dispersées selon les trois référendaires écologiques (p. 32) :

- dans l'espace : les points d'application planétaire étant infiniment divers,
- dans la composition : le niveau d'analyse extrêmement variable condamnait à un défaut de rigueur ou d'explication s'il était "trop général" ou à une carence de généralisation s'il était "trop réduit", les outils réels de synthèse étant, jusqu'à récemment, très limités (p. 428). La quantité de données nécessaires augmente rapidement dans les synthèses complexes,
- dans le temps : allant de l'étude de l'évolution (des sédiments, des organismes, ...) sur des millions d'années, à l'impact de l'industrialisation sur la gestion de l'espace rural (quelques décennies), à la croissance saisonnière d'un végétal ou à l'échange (instantané) du système sol-racine.

Jusqu'aux années 60, la donnée observée ne pouvait donc s'interpréter directement (comme telle) que dans l'étroit nucléus spécialisé (espace-temps-analyse/synthèse) qui avait présidé à son acquisition. Elle pouvait avec d'autres données du même nucléus contribuer à une conclusion spécialisée (article scientifique ou technique) et disparaissait en tant que telle pour à peu près toujours (au mieux, quelques moyennes étaient sauvées) (p. 300).

A partir des années 60, la conservation sur supports lisibles électromécaniquement puis électroniquement a pu être effectuée en fichiers pour des données, souvent indépendamment de leurs Descriptifs Techniques conservés par écrit.

Aujourd'hui, la combinaison de Bases de Données Relationnelles, de l'expertise du choix des caractéristiques (Système-Expert) et de l'intégration par modélisation factuelle permettent dans un ensemble d'intelligence Artificielle de conserver non seulement la DIC mais encore les modalités des options et propositions explicitant la connaissance (p. 428).

Ainsi la totalité de la connaissance scientifique écologique est descriptible et accessible.

Ceci a quatre conséquences immédiates.

- . Les données et démarches, rendues accessibles, permettent le contrôle, la vérification donc la scientificité des domaines concernés.
- . L'extraordinaire perte d'informations, encore actuellement en cours, source de méconnaissances et d'incompréhension n'a plus aucune raison d'être.
- . L'organisation des données constitue en soi une élaboration. Elle permet l'affranchissement du nucléus intellectuel initial d'acquisition, la ré-interprétation et la recombinaison *ad libitum* des connaissances initiales (DICs) ou élaborées (DSEs) : les bornes des spécialités ont concrètement sauté. On passe d'une "écologie" à sommation multidisciplinaire à une véritable écologie globale monodisciplinaire.

Ceci ne peut se faire sans une organisation rigoureuse de l'acquisition des données dans un langage mutuel univoque, abordée aux paragraphes suivants et une ré-évaluation de nos pratiques développées au chapitre V.

4.6.2. Situations des prélèvements dans le champ écologique (fig. 4-4)

Toute donnée provient d'un prélèvement. Pour la globalyse, tout prélèvement est limité par ses cotes (x, y, z, d) et sa composition. Réciproquement, toute donnée issue du prélèvement se rapporte à la portion temporospatiale x, y, z, d dont elle est par définition l'analyse spatiotemporelle la plus fine.

Celle portion s'inscrit dans le champ écologique par sa situation (X, Y, Z, D). Pour cela, il suffirait logiquement de quatre repères géodésiques permettant de situer ce prélèvement (cette donnée issue du prélèvement) dans l'écosphère. Ce pourrait être longitude, latitude, altitude et "date" (L, 1, A, D) où la date n'est pas prise qu'au sens calendaire, mais peut être précisée avec des unités de temps plus précises (minutes, fractions de secondes) (p. 38). Le niveau de composition étant indiqué par la nature de la donnée (= caractéristique).

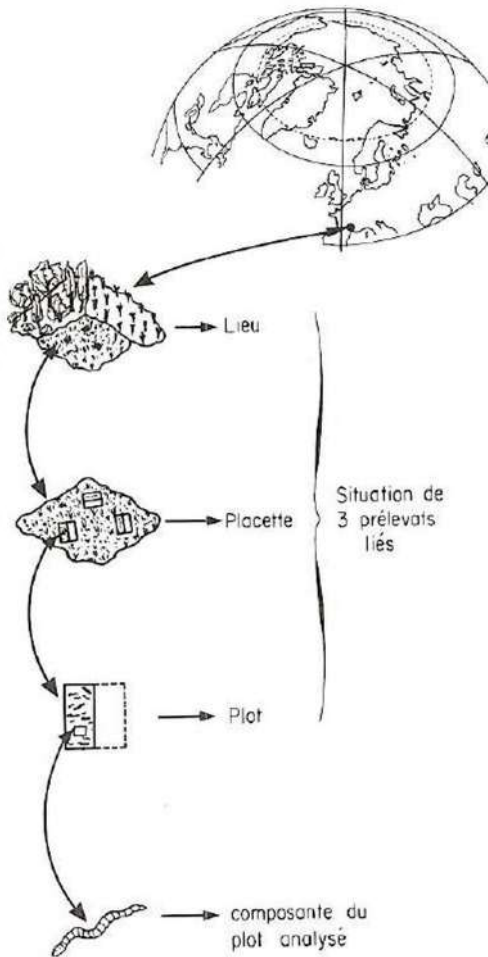


Figure 4-4 - La situation, spatiale des données ; exemple de hiérarchie cumulée des éléments de la composition de chaque prélèvement.

En pratique, malheureusement, la situation du prélèvement dans le champ écologique est tout à fait imprécise. Les moyens de situer avec précision un prélèvement sont généralement inutilement lourds. Il est préférable de situer, avec la plus grande précision possible, les prélèvements par leurs coordonnées géodésiques, et lorsque celles-ci sont quasi identiques de repérer ces prélèvements entre eux par des repères (X, Y, Z, D).

Pour le système de repérage généralisé, adopté dans la Base de Données Relationnelle ECORDRE, les placettes (surfaces ayant en commun des données), par exemple un mode de gestion : une sapinière, ou un itinéraire technique agricole, ou un traitement d'engrais dans une expérimentation au terrain) sont rattachées à des lieux repérés par les coordonnées (L, 1, ou longitude et latitude). Elles comportent des

repères ($X^i Y_j, Z_{it} D$) situant les plots dans ces placettes, où sont effectués des relevés (prises). Si nécessaire, par exemple en micromorphologie spatiale un système de pointage $Xy, Y2, Z2$, permet de repérer chaque donnée d'un mésoplot dans le plot, puis d'un microplot (à distances microscopiques) voire d'un picoplot.

Si le lieu est la localisation géodésique et la placette la portion d'espace où l'on collecte des données à partir de plots, il arrive que l'on soit conduit à subdiviser l'espace de la placette après la définition des plots. Ces unités spatiales peuvent en partant du plot être décrites vers des unités plus vastes en terme de macroplot, mégaplot, ...

Ainsi, toute donnée de composition quelconque peut être décrite en fonction de sa situation, de sa médiation spatiale (cote du prélèvement), de sa modalité potentielle d'extrapolation (cartésienne ou typologique) et d'intrapolation ponctuelle mais peut être repérée également dans l'écosphère ou dans tout sous-système temporospatial de celle-ci.

4.6.3. Champ écologique et informations (fig. 4-5)

Comme nous venons de le voir toute DIC est située ipso facto dans le champ écologique et est définie par sa composition et ses coordonnées spatio-temporelles.

D'un point de vue pratique dans l'organisation du travail, cette réalité obligatoire est actuellement rarement explicite. La tradition, parfois élevée au rang de dogme en certaines disciplines, a "imposé" des pratiques (plan d'échantillonnage, méthodes d'analyses, traitements par dossiers, ...) dont la justification -à l'origine pragmatiquement excellente- est souvent anachronique. Ces usages s'avèrent à présent inutilement contraignants et conduisent à la perte d'informations soit dès le départ (à la collecte), soit plus tard par une non accessibilité ou fluidité de cette information. Nous verrons (p. 300) cette situation actuelle classique et ensuite que celle-ci n'a plus de raison d'être (p. 307, 312), ce qui est indispensable au plan de l'écologie fondamentale (p. 334) mais aussi des interprétations et applications (chap. VI, VII et VIII).

Retenons simplement qu'une donnée acquise, quelle que soit la finalité initiale pour laquelle le travail d'acquisition a été effectué, doit circuler et être réinterprétable en fonction d'autres données situées dans le champ écologique, voire dans le domaine socio-économique (chap. VIII). En aucun cas, la DIC (obtenue directement du champ écologique concret) ne doit être perdue car elle est notre perception objective depuis notre environnement immédiat (p. 31) jusqu'à l'écosphère.

Cette remarque n'exclut nullement l'énoncé de la motivation pour justifier et organiser l'acquisition initiale. Si toute donnée doit être réinterprétable, elle doit d'abord être interprétée en fonction de l'objectif explicité par la motivation de la recherche qui en a assuré l'acquisition.

Notons que la distinction entre recherche fondamentale et appliquée n'a de sens que socialement en fonction de cette motivation initiale d'acquisition mais que cette distinction perd tout sens dans le cadre de ré-interprétations (p. 357).

Après avoir défini les données (p. 265) et prélèvements (p. 275), leur assemblage en ensembles et leurs qualités (p. 283) puis leur position dans le champ écologique (p. 292), nous reprenons ici la démarche pratique d'une première acquisition de données quelle que soit sa finalité, pour rappeler ses liens.

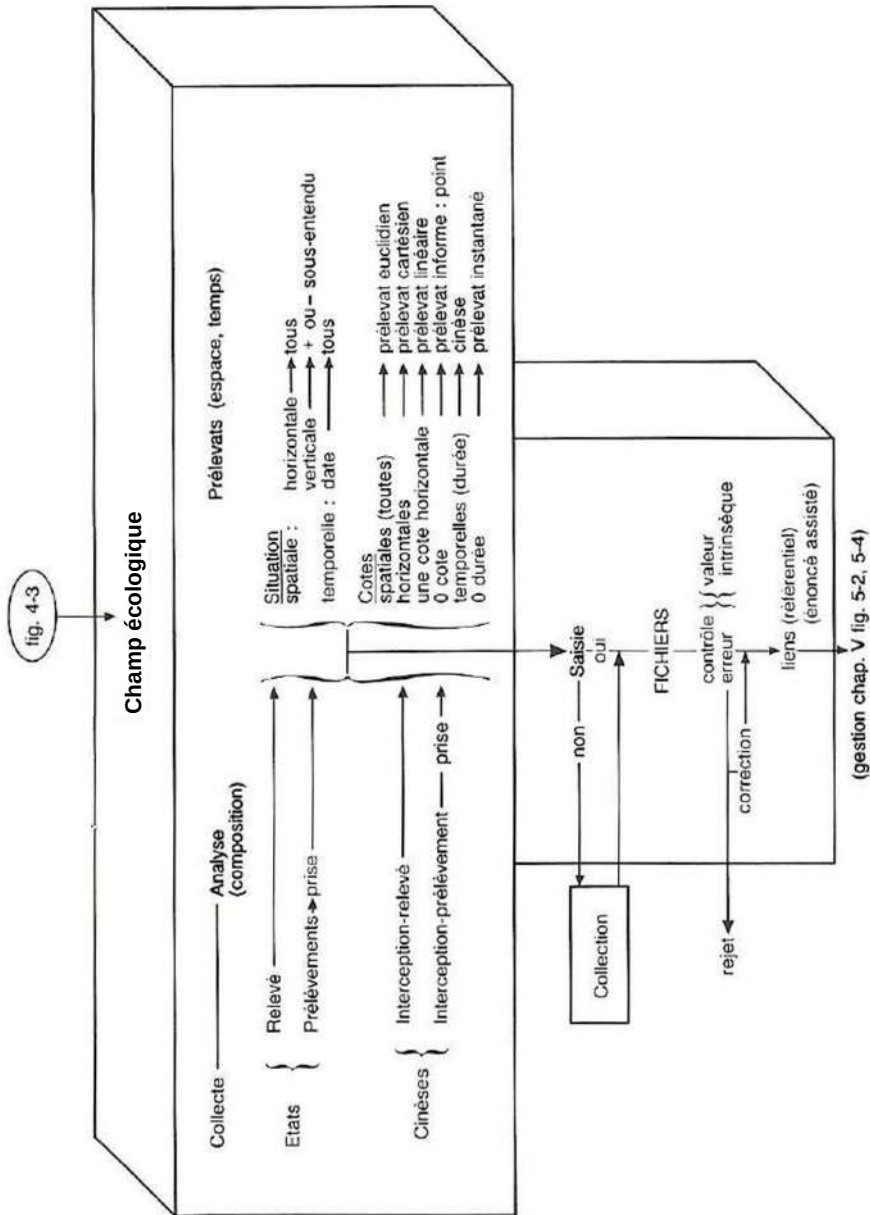


Figure 4-5 - L'acquisition des données : Liens entre ses modalités, son adéquation aux objectifs de recherche et la saisie conduisant à la gestion des données.

4.6.4. Le référentiel des données (fig. 4-6)

Quel que soit l'objectif de recherche ayant motivé la collecte d'une DIC, celle-ci résulte d'un processus d'options nous apportant un atome d'information sur l'écosphère. Cet atome pourra être regroupé dans tout ensemble de données et contribuer ultérieurement à toute synthèse interprétative (chap. VI) dans diverses approches systémiques (chap. VU).

La saisie des données se fait (ou se fera) pour un multi-usage des données grâce à la gestion de celles-ci dans des systèmes particuliers, dits Système de Gestion de Base de Données Relationnelles (SGBD(R)). Cette modalité lève l'un des grands handicaps de l'écologie (p. 317). Quelles que soient les modalités de collecte et d'analyse fournissant des données transitoires brutes sur supports papier ou magnétiques, en enregistrement automatique ou manuel, il y a intérêt à développer des procédures d'énoncé relationnel obligeant, au cours de la saisie sur support informatique, et avant le transfert dans une Base de Données Relationnelles (BDR), à l'énoncé de relations qui systématiquement lient la donnée au prélèvement, à sa situation, ses cotes, son descriptif technique et sa motivation.

Ces procédures d'énoncés relationnels, faciles à développer spécifiquement sur micro-ordinateur pour les saisies de routine, imposent une méthode et évite l'accumulation de données qui s'avèrent ensuite inutilisables. Malgré la diversité des situations concrètes, elles recouvrent une description unique : celle du référentiel des données qui permettra ultérieurement la normalisation des relations (p. 328).

Le référentiel des données a pour objet de repérer la donnée acquise dans l'écosphère par ses liens à cette écosphère et ses liens aux données ayant même position dans l'espace-temps écologique. Celui-ci s'appuie sur cinq concepts génériques liés à la donnée :

1) Le prélèvement : portion d'espace-temps indissocié ayant fourni la donnée. Le prélèvement est limité par des cotes spatiotemporelles, x, y, z, d (d pour durée). Les cotes peuvent être négligées, non enregistrées, ou délocalisées, plus ou moins complètement en exprimant directement par exemple le volume d'un prélèvement ou sa surface. Le principe de conservation des DICs devra toutefois être respecté. La durée peut également être "délocalisée" en exprimant les caractéristiques par rapport à une durée standard (g/s ou km/h, travail/mn, ...).

2) La caractéristique ou nature de la donnée que, par analyse de la composition du prélèvement, l'on concrétise depuis ce prélèvement par la donnée. Les modalités de l'analyse, portant usuellement sur tout ou partie du prélèvement, sont détaillées dans le descriptif technique (DT).

3) La situation des prélèvements dans l'écosphère est enregistrée totalement par quatre données (X, Y, Z, D) : les trois euclidiennes et la date (au sens de l'instant dans l'écoulement du temps). Mais en pratique, ceci ne peut pas se faire à toute échelle sans difficulté. La date est toujours repérable avec les précisions souhaitées. La situation euclidienne ne peut pratiquement, pour toute donnée individuellement, être enregistrée directement, il y a alors hiérarchie cumulable des situations et des prélèvements.

La plus élevée est le lieu indiquant la situation géodésique : longitude, latitude, altitude (L, I, A) qui permet de situer la placette d'étude. Celle immédiatement inférieure est la situation des plots dans la placette, décrite grâce à des repères euclidiens (X_a, Y_b, Z_c, etc.). Celle encore inférieure peut être un mésoplot (coupe microscopique ayant scs repères X₂, ...). On peut enfin connaître la situation dans une microprise par un microplot ("point" d'impact d'une lecture à la sonde de Castaing de la composition élémentaire d'un microvolume d'une coupe microscopique) (X₃, Y₃, Z₃).

4) La motivation de l'acquisition des données permet de référer à la responsabilité de l'acquisition, c'est-à-dire la propriété initiale des données et les raisons de cette acquisition (problématique, objectif, réalisation, essai, collecte fortuite, ...), voire le dossier administratif (contrat, thèse, ...).

5) Si nécessaire, l'identificateur assurant le lien entre les prélèvements associés et l'associateur (p. 282).

Le référentiel des données exprime donc, en fonction des trois référentiels du champ écologique (p. 37). 11 n'oblige pas à tout prendre mais permet de ne pas omettre l'essentiel vis-à-vis de l'objectif précis initial et de ne pas éliminer les moyens de référer les données objectives, les DICs, qui constituent collectivement la globalyse (p. 91). Ce référentiel s'impose aussi pour connaître la qualité de la source (liée aux auteurs de la motivation) et exprimer les liens essentiels de chaque donnée (fig. 4-7).

La donnée est ainsi dans un "contenant" analytique (la caractéristique), un contenant physique (le prélèvement), un contenant général (l'écosphère) et une justification sociale initiale (la motivation).

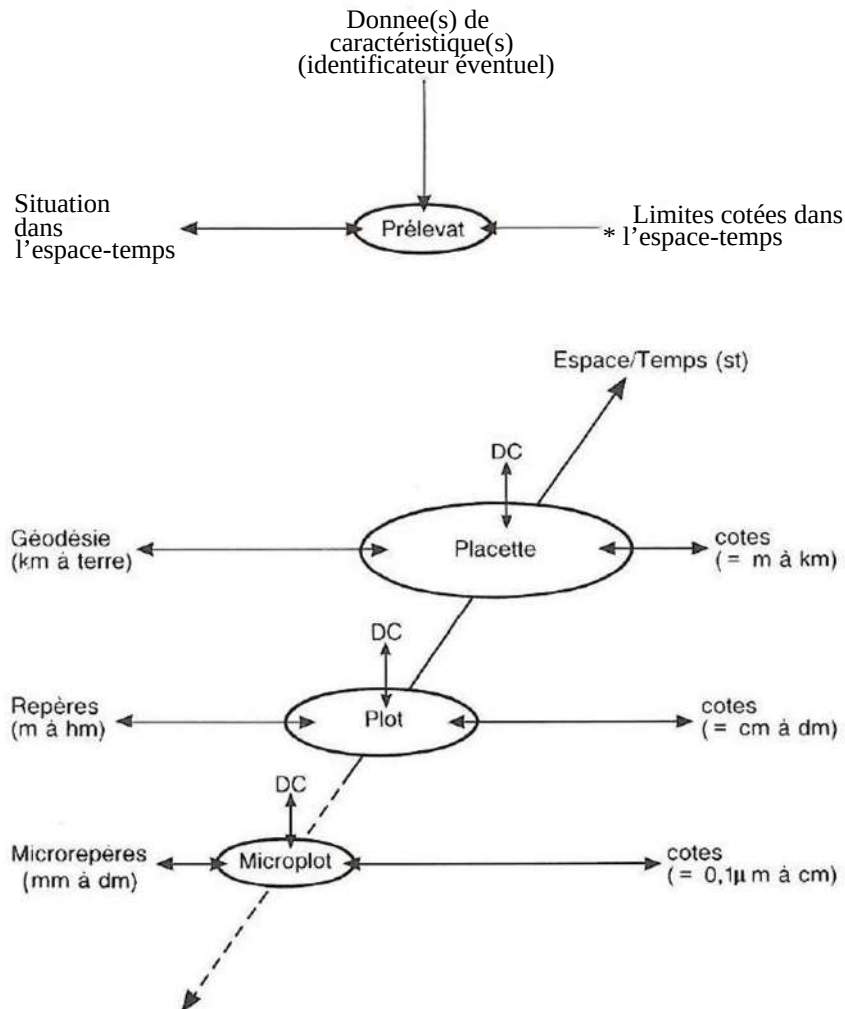


Figure 4-6 - Référentiel des données des caractéristiques (DC) aux échelles temporo-spatiales de la situation et des cotations des prélèvements (r/imens-roms/médiations). En haut, organigramme général ; en bas, applications (cf. fig. 4-4, p. 293).

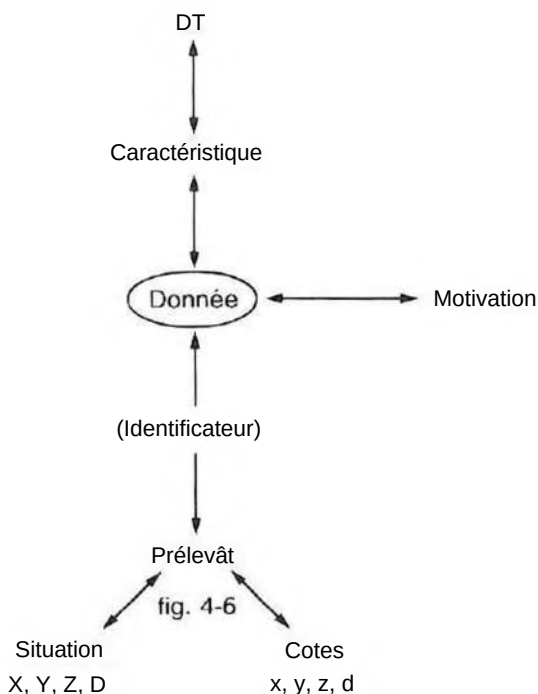


Figure 4-7 - Référentiel essentiel d'une donnée 1) à sa caractéristique, i.e. son ensemble, de données obtenues selon un descriptif technique (DT), 2) à sa motivation d'acquisition et 3) à son prélevât défini par sa situation et ses cotes (cf. fig. 1-6) éventuellement via un prélevât associateur ayant son identificateur.

4.7. L'acquisition de données : principes d'optimisation

On peut tenter de résumer des régies générales d'acquisition des données écologiques pour une stratégie d'acquisition optimale des Données Initiales Contrôlées (DICs).

1) Par un principe de sélection des options : que l'on peut appeler loi du moindre effort. C'est le choix de sites, de placettes, de prélèvements, de moyens d'analyse aussi performants que possible pour un objectif particulier motivant l'acquisition.

2) Par un principe de conservation des DICs et de leurs liens : c'est à chaque étape du travail le souci de ne pas "perdre" une information acquise, même si celle-ci "ne semble plus utile". Ce jugement utilitaire sur les DICs est nécessairement entaché d'une interprétation particulière résultant de l'objectif de recherche parcellisé et souvent d'hypothèses-propositions (p. 41, 344) qui, par essence, sont subjectives et insuffisantes. Puisque le travail d'acquisition est fait et les moyens modernes de gestion aisés, il faut conserver. La conservation est aussi le seul moyen d'une critique objective (*stricto sensu*) du travail.

3) Un principe d'objectivité. Pouvoir représenter l'objet grâce au référentiel des données aussi complètement que possible (malgré le principe de sélection et grâce au principe de conservation) avec des caractéristiques adéquates au champ écologique et des données adéquates aux caractéristiques. Enfin, si possible, des données informant sur la précision relative des DICs.

4) Un principe d'indépendance : les DICs peuvent être interprétées en fonction de motivations initiales mais doivent pouvoir être ré-interprétées indépendamment de celles-ci. Nous verrons, chapitre VU que l'acquisition des données suivra de plus en plus le réemploi de données antérieures et sera donc optimisée par rapport à ces dernières. L'acquisition écologique moderne des données ne peut se faire hors le respect de ces principes.

CHAPITRE CINQUIEME

UTILISATION DES CONNAISSANCES

5.1. Introduction

Pour des raisons historiques, tenant surtout aux contraintes matérielles interdisant une véritable synthèse des données (hors d'étapes très élémentaires : calculs de moyennes et traitements statistiques pauci-factoriels), le puzzle des disciplines concourant à l'écologie a élaboré des méthodes d'acquisition et de traitement des données plus ou moins sophistiquées ; traitement est pris ici au sens très large où la mathématique n'intervient que partiellement.

Chaque recherche, si elle n'est pas abandonnée pour tout ou partie au cours de sa réalisation, est enfin publiée, c'est-à-dire rendue publique. Sans publication, il n'y a pas de résultats, car les résultats scientifiques doivent par nature être réfutables donc accessibles. La publication doit permettre la critique de l'ensemble du travail.

Au niveau des techniques et recherches appliquées, il peut y avoir un certain délai avant publication, pour des raisons de propriété industrielle et d'amortissement des investissements, mais les acquis ne rentrent effectivement dans le corpus scientifique qu'après publication (même si dans le cadre restreint d'un laboratoire ou d'une entreprise, une diffusion limitée existe avant celle-ci).

Après publication, le travail peut être repris, complété, ré-interprété. Ce travail appartient dès lors à la communauté scientifique qui en dispose, sous réserve de la reconnaissance de la contribution de ceux qui l'ont assuré : éthique élémentaire.

Ce cheminement doit être évidemment préservé. Toutefois présentement, il ne se fait pas sans embûche dans le domaine de l'écologie et des techniques auxquelles elle concourt (agronomie, environique, médecine, ...). Il y a en fait une spectaculaire perte ou/et distorsion d'informations allant jusqu'à la désinformation et à l'anti-science (p. 305).

Faire circuler l'information transdisciplinairement, entre les disciplines du puzzle écologique, et arriver à une synthèse par une démarche monodisciplinaire de l'écologie n'est plus aujourd'hui utopique. Nous allons d'abord, pour en dégager les limites, décrire le cheminement "classique" des données du domaine écologique, puis montrer une alternative où les mêmes données et connaissances circulent "idéalement" sans contraintes (p. 307), enfin concrétiser la faisabilité actuelle, quoique récente, de la dernière approche (p. 312).

5.2. Les pratiques habituelles actuelles

5.2.1. Démarches classiques

Dans une approche méthodique d'un travail scientifique on distingue classiquement

- 1) l'élaboration d'un protocole
- 2) l'acquisition des données,
- 3) le traitement et l'interprétation des données pouvant conduire au retour partiel au point 1),
- 4) la publication de résultats,
- 5) l'usage public des résultats.

Ce schéma classique peut subir bien des avatars. S'il n'est pas la règle absolue, il est toutefois le plus généralement admis comme démarche coutumière logique, en sachant très bien qu'en pratique le cheminement réel est beaucoup plus confus et étatique mais s'ordonne *a posteriori* sur ce schéma, qui sera retenu comme plan d'exposé ci-dessous.

5.2.2. L'élaboration d'un protocole

Il y a une très grande diversité d'élaboration des protocoles d'études écologiques.

Il peut apparemment ne pas y avoir de protocole (étape virtuelle) lorsque le "hasard" des observations conduit le chercheur à une découverte "instantanément" perçue comme telle par ce chercheur. C'est par exemple le cas de la découverte d'une espèce nouvelle pour la science par un spécialiste reconnaissant d'emblée le fait, grâce à son savoir. Notons que ce "hasard" peut avoir été quelque peu provoqué par le chercheur dont le comportement d'observation du milieu l'avait en fait conduit à prélever instinctivement plutôt telles localités en écartant toutes les observations banales jusqu'à la découverte.

Un plan d'échantillonnage beaucoup plus conscient peut être suivi par le même chercheur surtout lorsque les objets d'étude ne sont pas directement observables et obligent pour être étudiés à une collecte préalable de prises.

Une autre modalité est celle où le chercheur veut d'emblée connaître une réponse à une question précise en fonction d'une problématique moins exhaustive et "improbable" que la découverte d'espèces nouvelles. Par exemple, connaître certains effets d'une agrotechnique, la nature des formations végétales à hêtre (*Fagus sylvaticus*) en Europe ou la composition en isotopes de l'azote des eaux de percolation. Une approche empirico-pragmatique (heureuse ou malheureuse) est alors mise en place dont l'efficacité dépend du degré d'élaboration des techniques utilisées, des incertitudes d'analyse (de la formulation des pesticides et de leurs modifications, de la signification du complexe biologique *Fagus sylvaticus*, ou de la qualité des dosages d'azote et de sa séparation isotopique), sans parler des contraintes matérielles, financières, humaines et temporo-spatiales de l'échantillonnage.

A ce stade, après une période exploratoire, qui peut conduire directement à des résultats tangibles semblables à la situation décrite ci-dessus, on peut prendre conscience des difficultés de l'acquisition, du traitement et de l'interprétation des données et élaborer de véritables plans de collecte. Ce sont de véritables plans d'action où les données sont collectées pour répondre, pour un niveau choisi de globalyse (surtout vis-à-vis des référentiels espace et temps), à une (ou des) question(s) précise(s), en utilisant des techniques d'acquisition normalisées.

Pour ce faire, toutes les étapes ayant été envisagées, l'écologue peut être amené à consulter un biométricien qui, jouant le rôle de conseil, cherchera à dégager ce qui peut constituer une configuration optimale d'acquisition de données pour une interprétation finalisée de celles-ci d'après les outils de traitement mathématique les

plus opportuns. Ces approches peuvent être assez sophistiquées, mais sont nécessairement diversifiées, comme l'illustre l'ouvrage collectif de FRONTIER (1983).

Entre le hasard de la découverte ponctuelle et le plan d'échantillonnage précis avec définition des objectifs, des techniques d'acquisition et de traitement, puis une optimisation probabiliste de l'échantillonnage (SCHERRER, sous presse), il y a une multitude de situations intermédiaires, dont une, très fréquente, d'un plan d'échantillonnage relativement frustré en raison des contraintes matérielles et humaines si contraignantes qu'il n'est pas possible de "faire mieux" (semble-t-il) pour la meilleure interprétation des données acquises. Cette dernière formule, théoriquement fort contestable, est dans la pratique souvent inévitable, ne serait-ce qu'en raison de la dispersion des moyens et des hommes, et des contraintes d'opportunité (temps-argent) : si l'on doit en réduire les effets, il n'est généralement pas possible d'en supprimer les conséquences.

5.2.3. L'acquisition des données

Fort d'une problématique assez précisée et d'un plan d'échantillonnage plus ou moins élaboré, le chercheur collecte des données soit par observation directe, soit après collecte de prises pour analyses dans le cadre d'un dispositif d'observations ou d'expérimentations au terrain ou au laboratoire.

Ici les difficultés pour suivre un plan d'échantillonnage commencent ; si une organisation chronologique précise a été définie par le protocole, les aléas climatiques, les pannes de matériel, les contraintes humaines (maladies et indisponibilité diverses), etc. perturbent, dans une certaine mesure, le beau plan initial. Les pertes de prises, les accidents inopinés, ne sont pas rares et leur importance absolue va croissante avec l'augmentation du nombre et de la sophistication des données. Plus la recherche écologique est écologique (c'est-à-dire exhaustive et précise) et plus la probabilité d'aléas croît. On peut, et l'on doit, accroître la fiabilité des acquisitions de données, mais de toute façon aucune acquisition ne peut être idéalement fiable et cet écart à l'idéal va, pour une technicité donnée, croissant avec le caractère écologique (= complexe) de la problématique.

Par ailleurs l'adoption d'un protocole conduit à un vieillissement au cours de son développement. Avec le temps et les aléas techniques, une procédure (p. 310) ou une technique peut être améliorée et même une nouvelle opportunité peut devenir disponible. Faut-il adopter cette amélioration ou faut-il conserver le plan initial pour permettre le traitement de données analogues ?

Ce qui est vrai du temps et de l'analyse d'acquisition, l'est de l'espace : une opportunité se présente pour étendre l'échantillonnage ou une contrainte pour le réduire, doit-on le faire ? Des observations (ou mesures) imprévues peuvent être fortuitement enregistrables, le chercheur peut même les considérer comme remarquables, voire essentielles. Faut-il en cours de route additionner ces données fortuites, donc non planifiées ? A chaque stade faut-il, pour une certaine efficacité, respecter le plan ou perdre de l'information ?

En définitive les plans d'échantillonnage précis et rigoureux peuvent être suivis d'autant mieux qu'ils sont courts dans l'espace, le temps et la complexité d'analyse de la composition : c'est-à-dire qu'ils sont pauvres.

On arrive à la conclusion pratique absurde : l'idéal serait un prélèvement pour une donnée à un instant, c'est-à-dire un échantillon réduit à une donnée par caractéristique, ou à l'inverse un plan d'échantillonnage qui serait modulable à l'infini ; mais est-ce alors un plan visant un objectif ? L'adoption d'un plan précis, toujours réclamé *a posteriori* au moment du traitement, est rarement réaliste concrètement, dans une recherche écologique, nécessairement complexe et originale.

Conclusion, il faudrait pouvoir rationaliser répétitivement une acquisition ordonnée mais libre autour d'une problématique évolutive. Nous verrons, pages 357, 444 et suivantes, que ceci n'est plus impossible : la flexibilité des protocoles a certainement un avenir considérable en écologie.

5.2.4. Traitement et interprétation des données

Les données peuvent être directement interprétées avec les moyens usuels du chercheur. La découverte de la nouvelle espèce perçue d'emblée, ou après analyse de ses caractères morphologiques ou biochimiques (acquisition des données), est directement descriptible et interprétée comme telle dans une publication.

Dans d'autres cas, un jugement empirique sur données d'observation directs ou d'analyse se fera de façon similaire. Ces classements découlent directement des données, que ce soit les progrès de la désertisation du Sahel, par comparaison de deux photos prises à deux dates successives, ou le constat que tel sol est plus acide qu'un autre.

Dans nombre de cas, on cherchera à résumer, condenser, synthétiser l'information. Classiquement, le résumé le plus courant est la moyenne des valeurs d'une caractéristique numérique ou la fréquence d'une caractéristique qualitative ; il y a perte d'informations, en ce sens que les détails des données sont gommés par la moyenne. On peut compléter cette moyenne d'une ou de valeurs donnant une idée de la distribution des DICs autour de la moyenne artificielle, *stricto sensu*, par différents indices dont l'écart-type est le plus fréquent. La perte d'information est moins grande mais la synthèse-condensation des données est moins bonne.

Prenons un exemple plus sophistiqué : les données corrélant deux caractéristiques par l'ajustement d'une courbe établie par FERRIERE *et al.* (1986). Il s'agit de l'ajustement à une fonction mathématique de la concentration isotopique tissulaire de ^{15}N de *Nicodrilus longus longus* (Ude 1881) en fonction du temps, dans une expérience de laboratoire. Les données ont été traitées par un logiciel d'ajustement classique qui a fourni un résultat que l'on pouvait en tant qu'ajustement juger comme excellent : $r = 0,989849$ avec $yl = 0,07214 + 1,1862x$. Ceci peut être publié et l'a été pour le caractère novateur qu'avait un tel résultat technique dans la discipline (BOUCHE, 1983).

Toutefois une observation de l'ajustement simple (rond) de la fig. 5-1 montre que les premières et les dernières données observées sont au-dessus de la courbe et que les points médians sont au-dessous. Il y a un défaut de courbure de la courbe ajustée. La disponibilité d'un logiciel de traitement plus adéquat a permis d'obtenir un ajustement qui passe par les points observés ($y = e^{A \cdot \text{soij}} + 1,9 \cdot M + e^{-0,368j} + 0,98*$) et dont la corrélation $r = 0,999557$ est à peine améliorée.

Si, sur les changements d'état l'erreur est faible, celle sur le calcul de la cinésie (le débit de ^{15}N) est de 51,6 % : le débit est sous-estimé de plus de moitié !

La loi mathématique obtenue est meilleure dans le deuxième cas que dans le premier. Les tests usuels permettent de connaître le degré de validité de la fonction mathématique en tant qu'ajustement aux données mais ne disent rien des risques pris pour l'usage de cette fonction : ce point capital ne doit pas être perdu de vue (p. 414).

L'adoption de tout outil statistique produit ainsi des données élaborées condensées issues des données initiales, ce qui est un progrès scientifique car il y a condensation par synthèse, accompagné *ipso facto* d'une perte de l'information sur la diversité des DICs. Cette condensation produit à partir de DICs des Données Secondairement Elaborées ou DSEs.

Remarquons que même un traitement interprétatif jugé comme excellent d'un certain point de vue (— coefficient r , par exemple) est un traitement imparfait. Comme les techniques d'acquisition de données, les techniques de traitement restent toujours perfectibles ; les Données Secondaires Elaborées (DSEs) ne "valent pas" les données initiales mais résument l'information en fonction d'un ensemble de DICs qui, lui-même, peut être modifié, par exemple, par ajout de nouvelles DICs.

En conséquence, les données initiales (DICs) sont le seul élément objectif (à leur qualité près, p. 288) et les DSEs sont provisoires.

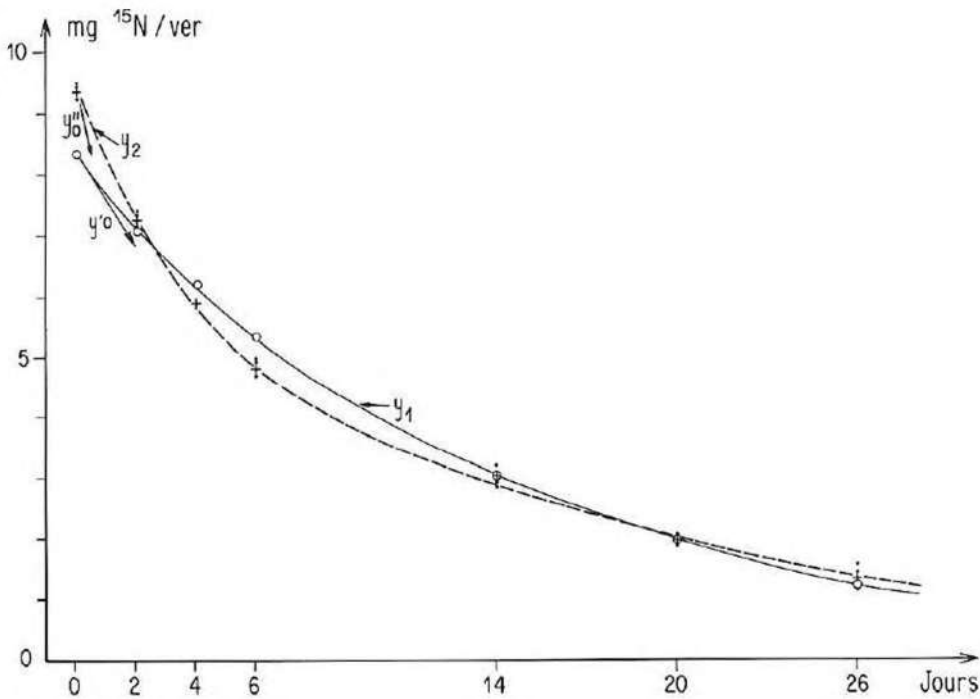


Figure 5-1 - Concentrations isolopiques en ^{15}N de lombriciens (points) étudiées au laboratoire. Ajustements des valeurs à une exponentielle simple (rond) et double (tirets, croix) permettant le calcul de débits y'_0 et y''_0 „(dérivées)

Considérons maintenant un traitement plus complexe. Cette complexité tendra à augmenter en écologie puisqu'elle est, par essence, celle de cette discipline visant à partir de l'analytique, par synthèse, au global. Il faudrait adopter un traitement multi-critère. Une analyse écologique effectuée à partir d'un niveau d'observation vers un niveau plus fin est d'autant plus explicative qu'elle prend en compte (ou tend à prendre en compte) tous les éléments de ce niveau.

L'acquisition des données tend à observer un nombre élevé et croissant de caractéristiques. Puis à partir de ces données une synthèse (telle l'AFC, p. 368) tendra à restituer une image du tout confrontable à une perception globale. Ces synthèses sont souvent désignées par les mathématiciens "analyses" car ils "extraient" de l'ensemble des données les traits pertinents qui résument l'information à partir d'une composition plus fine. Ces opérations séquentielles, conduites "dossier par dossier", tendent à résumer les données initiales en un nombre réduit d'indications dépendant de l'ensemble des données prises en compte.

Prenons le cas d'une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) dont nous discuterons plus loin l'importance, et en négligeant le problème de la perte d'information résultant du choix des lots par allotement des données numériques (qui est une perte d'information), nous constatons 1) que l'information se condense d'autant mieux qu'il y en a moins (ici la perte d'information est mesurée), 2) que réciproquement, pour un niveau de condensation (nombre d'axes factoriels), celle-ci est meilleure avec une condensation moindre.

A nouveau, l'information finale synthétique d'un dossier n'est qu'un pis-aller qui, si l'on s'y arrête comme seul résumé, traduit simultanément une perte, une condensation de l'information temporairement résumée et une dépendance vis-à-vis de la qualité des ensembles de DICs.

En conclusion

- Le choix des outils de traitement de données est toujours imparfait, mais perfectible.
- Ce choix dépend des objectifs particuliers poursuivis.
- Toute démarche synthétique se traduit par une perte d'information d'autant plus grande que les données sont complexes et riches, autrement dit que la synthèse à effectuer est importante.
- La démarche écologique, par essence globale et complexe, subit donc une perte d'information au cours de la synthèse d'interprétation.
- En conséquence, pour un niveau de perception-compréhension souhaité, il n'est pas optimal de pousser trop loin l'analyse mais de choisir des niveaux d'observation (p. 35) ayant une globalité suffisante pour permettre une synthèse optimale.
- En conséquence, il faut d'abord observer toute l'information disponible (= globalyse) de ce niveau avant toute proposition analytique amputant cet ensemble de données (p. 367).

5.2.5. La publication

Rendre public, c'est rendre accessible à la communauté humaine les connaissances acquises. Les contraintes matérielles d'impression, de rédaction et de temps ne permettent pas de tout dire et un choix, même inconscient, conduit, après l'interprétation, à de nouvelles pertes d'information.

La publication se fait après le choix de ce qui est "publiable", c'est-à-dire de ce qui a permis de tirer des conclusions que l'on pense pertinentes et nouvelles. Toutes les données originales (DICs) qui n'ont pas permis une interprétation concluante, ou que l'on n'a pas su ou pu interpréter, sont ainsi perdues par élimination en fonction du seul objectif spécifique qui a motivé l'acquisition sans égard à toute autre interprétation.

Les contraintes de coût de publication et diffusion obligent les responsables de ces canaux d'information à limiter le volume des publications ce qui conduit :

- à un fractionnement en notes séparées d'ensembles initialement cohérents, très préjudiciables à la globalité de l'interprétation écologique,
- à une auto-censure pour rentrer dans le carcan des quotas accordés par les canaux de transmissions. Celle-ci entraîne l'élimination des DICs, surtout si elles sont nombreuses.

Ces contraintes de coût de diffusion de l'information conduisent les responsables, pour obtenir une audience, à diversifier les publications paraissant dans un support médiatique. Ceci accroît l'intérêt des canaux de transmission (revues scientifiques, techniques ou de vulgarisation) vis-à-vis des récepteurs (lecteurs), mais limite le volume des articles et oblige à la dispersion des résultats d'un même ensemble dans divers supports.

Les contraintes de coût des publications poussent enfin à des choix limités de caractères d'imprimerie (latin, lettres grecques... rarement cyrilliques, japonaises) et à l'exclusion de nombreuses langues. Cela conduit à l'usage de langue étrangère, à éluder les concepts initiaux justifiant les protocoles, à banaliser l'interprétation des recherches, bref à des textes insuffisamment documentés (pertes d'information) et traduits approximativement (surtout pour les noms vernaculaires, la terminologie de techniques ou de milieux écologiques) (= distorsion d'information).

La tendance à une langue scientifique unique entraîne soit à un enrichissement illimité de celle-ci, incompatible avec les aptitudes limitées des récepteurs (lecteurs), soit à une perte d'information initiale (simplification à l'émission). Réciproquement, le choix d'une langue minoritaire ou rare réduit la réception potentielle mais accroît la fiabilité scientifique et technique de la communication pour les récepteurs pratiquant cette langue.

Nous n'abordons pas ici le cas où il n'y a pas de moyens de transmission, ce qui n'est pas rare pour les domaines novateurs par définition sans marché pré-établi.

En conclusion, la publication, quelles que soient son importance et ses qualités intrinsèques, est toujours très limitante et se solde par une perte d'information par autocensure ou censure, par l'indisponibilité des données objectives (DICs) trop nombreuses pour être publiées, enfin par une résistance à l'innovation. Ceci entraînera ultérieurement l'impossibilité du contrôle effectif des résultats.

5.2.6. L'usage des résultats

Les récepteurs de l'information (le public, spécialisé ou non) ne peuvent tout lire, entendre et voir. La capacité des récepteurs est très limitée et le spécialiste a un temps d'attention, hors ses propres travaux, nécessairement très restreint. Des aides à la sélection existent (interrogation de banques de références bibliographiques, par exemple) avec des lacunes inévitables (revues et documents non pris en compte, indexation limitante et souvent incorrecte) ; les articles retenus parviennent enfin sous une forme que le récepteur ne peut pas comprendre (langue) ou comprend imparfaitement (polysémisme de l'anglais-volapük, hypervocabulaire...), manque de temps pour une lecture attentive d'un texte d'autant plus dense qu'il a dû être condensé à l'émission, qu'il est riche et qu'il nécessite une attention "excessive" face à la concurrence considérable de publications plus accessibles (= texte facile, raisonnement orthodoxe, langue élégante au prix de l'imprécision et surtout apports restreints).

Il y a également impossibilité pour le lecteur de consacrer un temps suffisant au progrès des connaissances dans un domaine différent du sien. Ceci étant aggravé par l'absence d'un langage univoque (développement des jargons spécialisés).

En définitive il y a des lecteurs très spécialisés, peu nombreux et évitant les textes "difficiles", c'est-à-dire longs, précis et détaillés.

Le temps d'émission, généralement Liés long (mise en forme des publications sous contraintes), contraste, sauf rares exceptions, avec le temps très bref de réception.

Puis les articles vont se fossiliser dans la poussière des bibliothèques!

Ce blocage par submersion sous les informations émises a été joliment dénommé en référence au support papier "la marée blanche" ; il conduit :

- au quasi-rejet des textes élaborés, intellectuellement denses,
- par rétroaction à une frustration des auteurs "non lus",
- par réaction, à la répétition partielle ou complète de certains résultats (par exemple dans des revues et/ou langues différentes) ; cette redondance amplifiant la marée blanche,
- globalement à une perte d'information.

5.2.7. Les limites de la démarche actuelle en écologie

Dans un domaine aussi vaste mais unitaire que l'écologie, les moyens de transmission morcelés classiques :

- entraînent une perte d'information énorme car cumulée à tous les niveaux : acquisition, traitement, publication, usage,
- interdisent la synthèse par pulvérisation des présynthèses que sont les publications spécialisées,
- aturent et distendent l'information,
- entraînent la redondance de recherches par ignorance des travaux antérieurs similaires pratiqués dans le vaste champ écologique,
- entraînent, par défaut d'accessibilité, une fossilisation de connaissances, pourtant nécessaires,
- obligent à un conformisme pour rentrer dans les moules orthodoxes, par nature conservateurs donc archaïques (à tout égard : support, langue, modes, ...).

En définitive une très faible quantité de l'information pertinente acquise, effectivement généralisée mais fort déformée par les possibilités d'émission puis de réception, atteindra la communauté des écologues.

D'ailleurs les rares interprétations accompagnées de quelques données secondaires (DSEs) parviendront seulement à quelques éléments d'un public intéressé, mais indisponible par saturation.

En rupture avec cette situation, l'écologie en tant que science doit mettre à disposition les faits objectifs, les seuls étant les DICs, pour permettre une réfutabilité de toutes les interprétations de cette science. L'extraordinaire perte d'information, redondance de celle-ci et rigidité des modalités d'acquisition-interprétation-communication, interdisent dans la pratique l'élaboration d'une écologie effectivement globale, embrassant à la demande les divers niveaux de perception et d'interprétation du champ écologique (p. 34).

Ces pertes considérables sont aggravées par la non-interprétation, ou par la communicabilité/disponibilité opérationnelle extrêmement restreinte, de ces publications. Cette perte deviendrait quasi nulle par la mise à disposition des DICs et l'exposé critique, optimisable par approximations successives, disponible en Systèmes-Experts (p. 428).

Les conséquences de ces difficultés tant économiques (efficacité des recherches) que sociales (techniques mises en oeuvre dans un épais brouillard de risques) et intellectuelles (scientisme naturaliste et aveuglement des techniciens) sont beaucoup trop grandes pour être occultées et surtout pour qu'un effort ne soit pas entrepris pour réduire les impasses habituelles des pratiques actuelles décrites ci-dessus.

5.3. Les pratiques souhaitables

5.3.1. Introduction

Nous venons de voir, au paragraphe précédent, qu'en l'état actuel, le mode même de conception, de réalisation et de communication des acquis écologiques interdisait une véritable synthèse critique de la discipline, pour plusieurs raisons que l'on peut essayer de résumer pour en surmonter les difficultés :

- perte des informations sous forme :
 - . de données initiales, soit dès l'acquisition, soit pendant le traitement, enfin en publication où seules de rares DICs trouvent place. Le récepteur enfin ne peut matériellement utiliser les rares données objectives qui l'atteignent,
 - . de données élaborées (pour partie),
- rigidité des modalités d'acquisition,
- traitement séquentiel, recherche par recherche, dossier par dossier,
- cloisonnement disciplinaire,
- lenteur excessive de la communication tant à l'émission qu'à la réception,
- langage univoque commun inexistant,
- incommunicabilité des relations complexes,
- impossibilité de synthèses critiques du complexe,
- impossibilité d'une vérification objective, et d'une réfutation des conclusions par indisponibilité des DICs et des démarches interprétatives explicitées.

Pour une véritable écologie, et corrélativement pour sa crédibilité, il est indispensable de mettre en place des démarches d'acquisition, de gestion de données, de traitement, d'interprétation, d'intégration, de ré-interprétation, d'acquisition, etc. en continu. Toute démarche dans le champ écologique, définie au paragraphe 1.3.2., doit s'effectuer (idéalement) sans heurt afin de permettre une construction logique et critique de l'écologie.

Pour cela, quelques grands principes doivent être dégagés d'abord puis nous verrons, paragraphe 5.4., comment une approche concrète de la gestion des faits est possible, celle des connaissances étant abordée ultérieurement (chap. Vil).

5.3.2. Mouvements et synthèse d'informations

Les données écologiques objectives (DICs) sont des atomes de connaissances mais ne sont pas indépendantes (p. 465) ; elles sont reliées par de multiples liens. Rappelons que dans un cas très simple, 3,3 est lié à pH, lequel est lié au sol où ce pli a été mesuré. Ces données sont reliées entre elles par les coordonnées spatiotemporelles et se situent dans le champ écologique par leur caractéristique plus ou moins analytique. Ces relations sont descriptibles par le référentiel des données (p. 296).

L'écologue, en tant qu'individu, ne peut simultanément percevoir, donc synthétiser, l'ensemble des propriétés sur l'ensemble de l'écosphère : il est un spécialiste. L'écologue, en tant, que scientifique, doit percevoir et synthétiser l'ensemble des données et confronter ses interprétations pour vérification au réel. Il y a ici une contradiction expliquant la situation "classique" décrite paragraphe 5.2.

Or nous savons aujourd'hui potentiellement gérer très vite le complexe grâce aux ordinateurs.

1) Toutes les DICs peuvent être enregistrées (stockage = fichiers des banques de données) ce qui est rigide.

2) Cette rigidité peut être levée. Toute donnée peut circuler grâce à l'énoncé de ses liens qui de proche en proche permettent de situer chaque donnée dans l'"espace" multidimensionnel de la globalyse du champ écologique. Ceci est présentement possible grâce aux Systèmes de Gestion des Bases de Données Relationnelles où les données sont liées à la fois dans les ensembles auxquels elles appartiennent et par les liens qu'elles ont avec l'écosphère. Dans ces bases, le schéma conceptuel peut et doit

se superposer au référentiel des données (p. 315). De cette manière toute donnée peut être décrite et toute information scientifique objective reste accessible car des accès automatiques permettent de la retrouver. Ceci est opérationnel, avec quelques réserves techniques relatives aux données à enregistrement analogique (p. 291), et exige l'usage du référentiel des données comme schéma conceptuel unique.

3) La description des DICs devient ainsi systématique et totalement logique car le schéma conceptuel de la Base coïncide avec la réalité relationnelle des DICs. Elle implique une formalisation qui méthodiquement pourchasse les erreurs (p. 288) et les redondances d'informations (p. 378).

4) Les données accessibles doivent être synthétisées (ce sera l'objet du chapitre VI) par des interprétations et, avec l'aide de DICs nouvelles, par approximations successives (p. 357). Cette synthèse par approximations répétées permet

4a) une discrimination des ensembles et caractéristiques importants pour toute problématique écologique : il s'agit d'une typologie de systèmes,

4b) une élaboration avec tout modèle mathématisé (ajustement, formulation, infosystème), transformant des Données Initiales Corrigées en données élaborées. Cette élaboration à la fois s'"alimente" en DICs (ou DSEs préalablement issues de DICs) dans la base et produit des données élaborées (DSEs encore plus élaborées),

4c) une explication des options et propositions et une évaluation des risques (choix d'experts et décisions) dans des Systèmes-Experts.

Ces divers outils tendent ainsi vers une fusion où les données initiales et leurs diverses synthèses élaborées (à différents stades et sous différents angles) sont décrites, accessibles et figurables. Ces divers outils permettent une véritable Intelligence Artificielle des écosystèmes (y compris agroécosystèmes) (p. 433).

5) Ceci entraîne une systématisation générale sans perte d'information objective (= DICs) qui élimine beaucoup d'anciens faux-problèmes (p. 455) mais oblige à une optimisation générale par élaboration itérative de l'ensemble des connaissances (ce sera l'objet du chapitre VII).

6) Cette systématisation générale oblige en écologie à l'adoption d'un langage spécifique univoque, sur lequel le présent ouvrage insiste dès l'avertissement, et qui est heureusement relativement restreint (<■/". lexicque, p. 564).

A la manière de l'informatique médicale, par une sorte de tomographie fonctionnelle des écosystèmes, l'informatique en écologie permet d'entrevoir une visualisation de plus en plus précise des propriétés souhaitées. Cette possibilité rompt totalement avec les pratiques de l'époque où les spécialistes, enfermés dans le champ étroit de leurs disciplines, étaient condamnés à gérer une information pauvre et insuffisante en fichiers, en dossiers séquentiels statiques, en publications morcelées évoquant des recherches intégrées (ELLENBERG, 1971).

L'écologue, praticien ou fondamentaliste, dispose aujourd'hui des outils lui permettant d'atteindre l'objectif de sa discipline. De même que la biologie moléculaire a longtemps attendu l'élaboration des outils permettant, dans les années 50-60, d'asseoir ses propres fondements, l'écologie a longtemps attendu ses outils : ils sont maintenant disponibles.

Reste à effectuer leur mise en oeuvre, celle-ci obligeant à un changement radical d'attitude.

Il s'agit fondamentalement

- de renoncer aux approches séquentielles, partielles ou morcelées : toute focalisation doit se faire à partir, dans et pour un cadre intégrateur (p. 438),

- de percevoir la DIC pour ce qu'elle est : une information totalement objective, liée au champ écologique, qui est et doit rester disponible. En conséquence, elle n'est plus uniquement liée à une étude particulière, à un dossier d'analyse, à une recherche sectorielle ; elle est la base de nos connaissances sur l'écosphère dont les interprétations s'appuient exclusivement sur de telles DICs. La DIC est donc la base objective et résulte d'une acquisition rigoureuse (chapitre IV),

- de ne plus considérer qu'une donnée est essentiellement acquise pour un objectif fini (mesure pour une appréciation technique, tels les effets d'un engrais dans

une culture, ou pour une recherche particulière, comme la mesure de la fixation asymbiotique de l'azote). Au contraire la donnée participe à une connaissance générale où, en tant que telle, elle doit s'inscrire par des relations dans la globalyse. Elle doit être sauvegardée (ce que les meilleurs écologues font depuis quelques années), être logiquement reliée par toutes relations objectives possibles, c'est-à-dire accessible en Bases de Données Relationnelles. Ainsi elle pourra constamment être réinterprétée dans le cadre de recherches analytico-synthétiques en s'inscrivant dans le champ écologique (p. 35), voire socio-économique (p. 25). Or ces champs ne sont limités ni spatialement, ni temporellement, ni analytiquement.

5.3.3. Connaissances et Intelligence Artificielle

Dans le paragraphe précédent, l'importance des DICs et de leurs liens a été soulignée comme fondement objectif de notre connaissance du champ écologique (= globalyse). Mais la connaissance que nous avons des systèmes écologiques ne saurait se réduire aux seules DICs. Nous avons une perception empirique antérieure, même mal assurée, enfin un héritage culturel acquis notamment grâce aux moyens classiquement mis en oeuvre - et encore couramment utilisés comme décrits au paragraphe 5.2. Il y a enfin toute une série de faits qui ne sont pas réductibles aux données objectives mais qui peuvent être considérés par le spécialiste comme quasi certains, comme "évidents" ou comme suppositions temporairement acceptables.

Parmi les faits, il y a également les Données Secondaires Elaborées (DSEs) à partir de DICs perdues et de propositions (p. 344). Le spécialiste peut encore considérer comme faits acceptables, faute de mieux, des Données Expérimentales de Potentialités (DEPs) issues d'expériences effectuées en microcosmes et démontrant, hors champ écologique, des potentialités des systèmes spontanés (p. 267).

Comme on le voit les faits, qui peuvent être invoqués par les spécialistes concourant en tant qu'experts à l'écologie, sont de qualités très inégales, allant de données et de résultats obtenus par inférence à partir de DICs, à des supputations et évocations de potentialités. Ces faits sont l'état de la connaissance. La démarche scientifique revient à ordonner ces faits et, en s'appuyant de préférence sur les plus objectifs, à réfuter les faits plus hypothétiques à partir de ces premiers et d'un nombre réduit d'hypothèses... Ou plus exactement il s'agit de reformuler des hypothèses, elles-mêmes de plus en plus validées par réfutations successives. Les objectifs techniques sont approchés de la même façon.

Pour ordonner ces faits, il y a besoin de règles qui peuvent être de deux natures différentes. D'une part, celle qui sont édictées par un spécialiste, expert en son domaine, en tant que "loi" heuristique (= règles de la recherche et de la découverte) qui sont dénommées aujourd'hui plus succinctement heuristique (p. 102). D'autre part, celles qui découlent d'une organisation des faits selon une procédure du type : s'il y a ceci et cela, alors... ou s'il y a ceci, mais pas cela, alors... etc., de façon enchaînée.

Les progrès rapides de l'informatique, et notamment ceux des différentes disciplines concourant à l'intelligence Artificielle, permettent depuis peu un abord rationnel des connaissances. Les logiciels progressent rapidement, et l'écologue, qui n'a pas en charge ces développements informatiques, doit néanmoins en comprendre la portée car ces nouveaux moyens transforment totalement les modalités de son travail en lui permettant d'exercer enfin en toute plénitude son art.

En l'état actuel deux outils interdépendants enchaînés (concaténés) peuvent être mis en oeuvre.

1) Les Bases de Connaissances (BdG), très récentes, sont appelées à jouer un rôle central. Elles contiennent, en principe, la) une base de faits (écologiquement objectifs ou non) et. 2a) une base de règles. Dans cette dernière, sont stockées les heuristiques et les connaissances procédurales. Une Base de Connaissances contient donc l'état des connaissances objectives, déduites, calculées, subjectives... que le spécialiste utilise à un moment donné. L'expert y explicite ses connaissances relatives

tant aux faits qu'aux règles qu'il applique à ces faits. Cela rend possible, s'il y a cohérence conceptuelle et objet commun d'étude, la fusion dans une même BdC issue de divers spécialistes-experts. C'est la défocalisation du spécialiste qui contribue ainsi à une écologie réelle (= globale).

Un logiciel particulier permet de mettre en oeuvre les faits grâce aux règles par des inférences (p. 342) et est nommé pour cette raison moteur d'inférences.

A cette BdC est adjoint un logiciel pour périphériques permettant un dialogue homme/système informatique. Ce logiciel se nomme Système-Expert et permet de regrouper l'état de l'art non pas d'un expert mais de divers experts ayant rempli tour à tour des rôles complémentaires dans l'élaboration du système permettant la gestion des connaissances (BDR, BdC, moteur d'inférence, interface homme/machine).

En l'état actuel on dénomme souvent "Systèmes-Experts" des procédures informatisées réduites à de petits secteurs d'application où, les heuristiques étant nombreuses, la consultation du spécialiste s'imposait antérieurement mais pouvait, selon un mode descriptif relativement élémentaire, être résumé dans un tel système qui, sans moteur d'inférence évolué, reproduit par exemple le processus déductif d'une clé dichotomique. Ces systèmes informatisés, qui sont fondés sur l'avis d'un (ou d'un groupe homogène réduit de) spécialiste(s) et qui ne mettent en oeuvre qu'une intégration réduite sont avant tout des systèmes de diagnostics (p. 428). Ils peuvent déjà rendre de grands services pour des approches particulières bien ciblées où les Bases de Connaissances développées restent très élémentaires ou virtuelles. Il est prévisible que la démarche écologique elle-même s'appuiera sur de tels systèmes explicites d'abord en petits systèmes morcelés, puis de plus en plus en systèmes évolués intégrés où la Base de Connaissances vraie, avec un moteur d'inférence, stockera un grand nombre de règles et de faits permettant des inductions.

2) Toutefois, les Bases de Connaissances sont fondées sur des règles et un certain nombre de faits hypothétiques ou résultant directement de DICs à partir de données objectivement écologiques. La gestion de ces données peut se faire par le troisième outil : la base de données qui stocke ces données et surtout les rend mobiles et réutilisables à la demande grâce à un Système de Gestion de Base de Données Relationnelles (SGBDR) fondé sur les liens entre données (p. 265).

Le Système Relationnel, comme nous le verrons, n'est pas le seul possible en Base de Données, mais il est présentement le seul adéquat à l'écologie car il permet la reproduction informatique du référentiel des données (p. 296) comme base de gestion et voie d'accès aux données. Certaines BDR et BdC sont interfaçables.

La description pratique de ces Bases de Données Relationnelles sera d'abord faite (p. 312). Les diverses interprétations écologiques fondées sur des données seront traitées au chapitre VI. Ensuite, le rôle des Bases de Connaissances, gérées par Systèmes-Experts, sera décrit en tant qu'outil essentiel dans la démarche écologique, tant dans l'utilisation des connaissances, dans la procédure d'acquisition de nouvelles connaissances, que dans la réfutation scientifique des résultats (chap. VII).

Ces deux types de Bases (fig. 5-2) informatiques permettent à la fois la conservation, la correction et l'inter-relation des connaissances, c'est-à-dire se prêtent à refléter l'état même de la science écologique (p. 105) : c'est leur propriété essentielle.

Ajoutons-y la souplesse et la rapidité d'exécution qui rendent ces logiciels non seulement indispensables au développement de l'écologie mais de plus en plus performants pour la communication entre experts de spécialités différentes ayant un minimum de langage écologique commun.

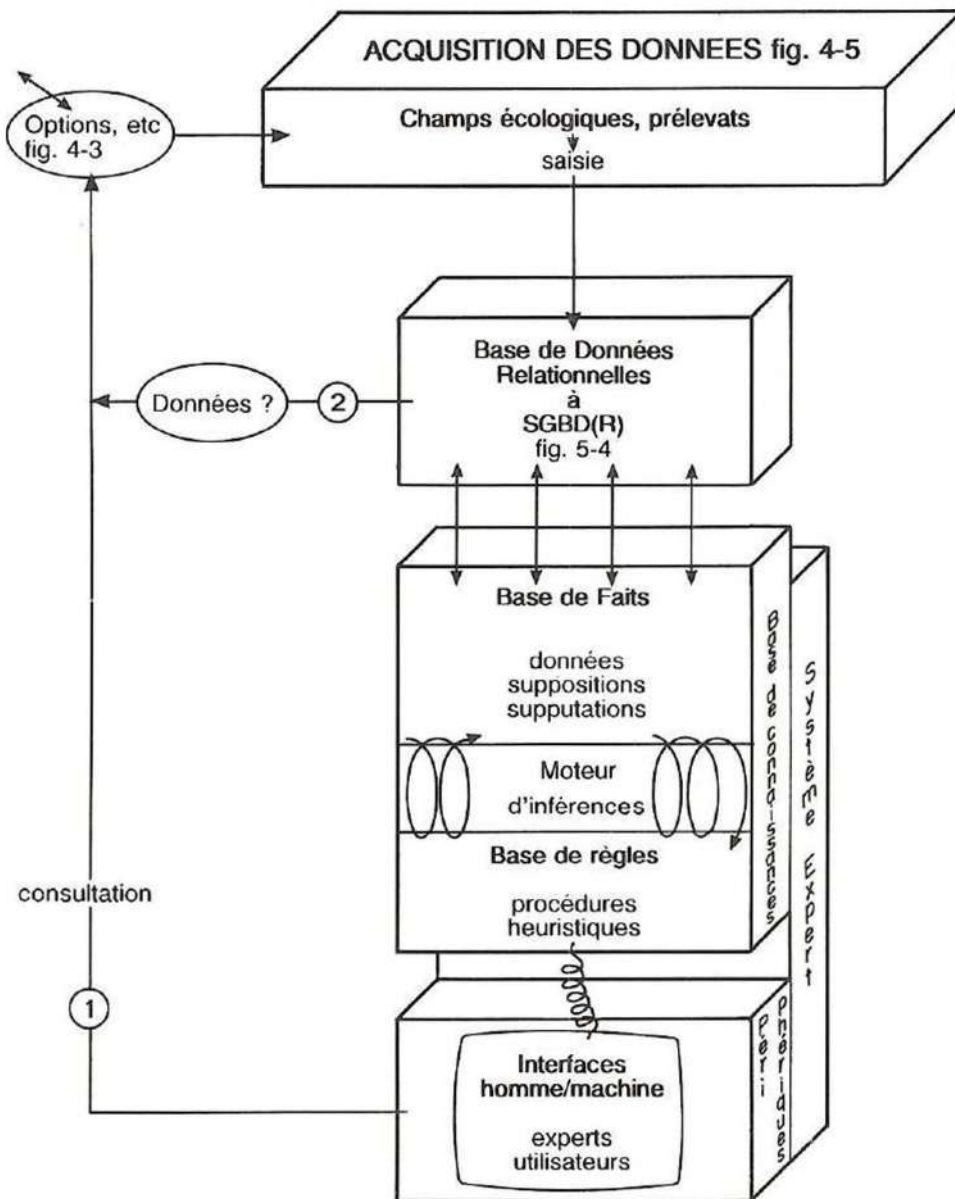


Figure 5-2 - Relations entre les divers modules d'acquisition de données, de gestion (BDFU, d'interprétations (BdC) et d'interfaces en Système-Expert.

5.4. La gestion des données

5.4.1. Introduction

Après les blocages très concrets, décrits au paragraphe 5.2, nous venons de voir, au paragraphe 5.3., les objectifs généraux que l'on pourrait souhaiter acquérir en écologie au niveau de tout système. Ce domaine de connaissances est considérable et ne pourra être abordé que partiellement, peu à peu, mais doit l'être sans perte des informations objectives (DICs) et de leurs liens, puisque ce sera toujours le facteur limitant la qualité des interprétations.

Eviter les pertes d'informations implique un énoncé des méthodes d'acquisition effective, puis de gestion de l'information avant et à tout stade de l'interprétation. Les interprétations peuvent toujours être reprises, complétées, voire remises en cause.

Comment concrètement procéder ?

Nous savons que les connaissances, y compris sur les techniques, évoluent très vite ; il faut donc une procédure flexible. Nous savons aussi que chaque composant de l'espace-temps ne se reproduira pas (ne serait-ce qu'en raison de l'écoulement du temps). Nous savons enfin que nos interprétations n'atteignent jamais à la "Vérité" mais tendent, à la meilleure représentation possible. Il faut donc une méthodologie réactualisable en permanence.

Souplesse, conservation, ré-actualisation et correction sont aujourd'hui possibles, grâce au développement de l'informatique puisque les Bases de Données Relationnelles possèdent ces propriétés.

Les données ne sont pas, malgré leur nom, "données" mais acquises à la suite d'options d'acquisition portant sur leur espace-temps et leur modalité d'analyses. Par contre une fois acquise la donnée initiale corrigée (DIC) a un caractère immuable : elle est la connaissance la plus petite, l'information unitaire la plus précise pour sa position dans le champ écologique. Avant l'acquisition, il est toujours possible de modifier les conditions d'acquisition, i.e. la nature de la donnée, après il n'est plus possible que de l'interpréter parmi l'ensemble des données déjà acquises (ou alors il faut retourner aux collections, lorsque c'est possible, p. 291).

La DIC étant l'information unitaire que nous avons sur le champ écologique, notre travail vis-à-vis des données se résume en quatre étapes :

- 1) leur acquisition conduisant aux DICs,
- 2) leur saisie avec leurs liens décrits par le référentiel des données,
- 3) leur conservation-circulation en Base de Données Relationnelles,
- 4) leur interprétation conduisant aux DSEs.

La conservation-gestion doit être faite de telle manière qu'elle permette une restitution par circulation rapide des données (DICs et DSEs, voire DEPs) pour la ré-actualisation des interprétations en DSEs ou pour compléter les DICs afin d'avoir toute souplesse d'utilisation. Cette souplesse est essentielle, mais est techniquement limitée dans certains Systèmes de Gestion de Bases de Données (SGBD) (p. 317).

Remarquons que l'acquisition des données (chap. IV) est nécessairement réductionniste par ses options, c'est-à-dire est un appauvrissement par rapport au réel du champ écologique ; l'interprétation (chap. VI) est nécessairement une généralisation hypothétique(= proposition) ; même après vérifications le doute est indispensable ne serait-ce qu'en raison du nombre limité de DICs acquises.

On voit que dans les opérations d'élaboration, i.e. acquisition, gestion, interprétation, seule la gestion des données relève d'un art qui peut être tout à fait satisfaisant. Elle peut être remarquablement améliorée par rapport à la situation classique (p. 300), véritable gaspillage organisé.

Reprenons ces trois étapes du travail aux paragraphes suivants.

5.4.2. Les choix analytiques (fig. 4-3, p. 284)

Les choix analytiques relèvent d'options (hypothèses) motivant initialement la sélection de certaines DICs dans le champ écologique. Ces options ont été discutées (p. 41, 267) mais dépendent de l'état antérieur des connaissances, autrement dit des interprétations antérieures, ce qui peut (pourra) se faire maintenant dans le cadre d'une Intelligence Artificielle réelle des connaissances (p. 309, 433). Les données objectives (DICs) peuvent temporairement être substituées par des suppositions (p. 344) ou par des DEPs (p. 267) issues de microcosmes (p. 400) dans l'élaboration d'infosystèmes.

Pour être totalement efficaces et définitivement utiles les options doivent donc être faites avec un énoncé explicite. S'il est légitime d'atteindre un objectif limité immédiat, motivant l'étude, il est indispensable de conserver les données (DICs) liées par leur référentiel (p. 296), ce qui concrètement se fait en Base de Données Relationnelles (BDR).

Quelles que soient les options de l'analyse initiale ayant permis l'acquisition d'une donnée dans le champ écologique, celle-ci constitue la seule information sur laquelle se fondera toute interprétation, toute connaissance. Les jugements sur la pertinence de conclusions dépendront des données effectivement disponibles (d'où l'importance de leur mise à disposition, c'est-à-dire de leur restitution) et des interprétations qui en seront faites. On peut toujours revenir sur l'interprétation, nullement sur la DIC qui joue ainsi un rôle fondamental.

Or objectivement, les DICs sont reliées à leur champ écologique par leur situation, les cotes des prélèvements et le descriptif technique de l'analyse : il s'agit de Relations. Certaines autres relations découlent également des choix de globalyse, telle la coïncidence spatiale de données reliées entre elles par une coïncidence temporospatiale ou par un déroulement diachronique, tel l'ensemble des données de la même caractéristique, telles les données provenant d'une association de prélèvements (p. 282), etc.

Les données sont aussi reliées à leur contexte social : avant publication elles sont la propriété de l'acquéreur de données qui de toute façon en conserve, même après publication, la responsabilité quant à la qualité de celles-ci. Indiquer le programme et le responsable ayant permis initialement son acquisition constitue les relations de motivation (p. 296) initiale d'acquisition. Organiser les relations directement issues des modalités d'acquisition revient à décrire en totalité la méthode d'acquisition (et ses limites) et à ne pas dissocier la donnée de ses limites de précision (analytiques, médiation) et ultérieurement les DSEs de ces mêmes limites.

5.4.3 . L'interprétation : les choix synthétiques

Une donnée n'a aucun sens ; ce sont les ensembles de données qui font l'objet d'une interprétation. La plus élémentaire interprétation étant par le discours (la donnée A est plus grande que B, ...) mais souvent le traitement mathématique condense l'information (la moyenne de l'ensemble {A}...) dans une série de démarches synthétiques.

Le choix de la création d'un ensemble est souvent "évident" car il découle du cadre étroit d'une étude sectorielle : ces objectifs (le modèle conceptuel) ont commandé la constitution d'un ensemble de données précis résultant des options d'acquisition. Par exemple, pour connaître la "structure" d'un peuplement lombricien, on a pris la masse individuelle des nombreux individus de stade connu de plusieurs espèces de lombriciens capturés dans des prélèvements euclidiens de sol d'une prairie : il sera évident de calculer les masses moyennes de chaque stade et chaque espèce présente, puis d'estimer celles de chaque espèce, voire celle de l'ensemble du peuplement, etc.

Moins évident, sera l'utilisation des mêmes données, témoignant de la présence des espèces de ce lieu, dans une étude générale sur la distribution des espèces européennes de lombriciens : l'étude n'est pas initialement faite pour cela mais doit contribuer à cette synthèse puisque l'acquisition des données a été faite et que le résultat est publié (public). La réorganisation des données en ensembles totalement imprévisibles par rapport à l'objectif initial d'étude doit pouvoir être effectuée et ré-effectuée indéfiniment pour les objectifs les plus variés.

Mais cette réorganisation d'ensembles n'est pas neutre. A tout stade, elle implique que les données acquises soient valables pour le nouvel objectif recherché, "valable pour l'objectif recherché" est un jugement de valeur empirique. Même lorsqu'on a vérifié statistiquement la "validité" d'une donnée dans un ensemble, on ne porte un jugement que sur un aspect de celui-ci. Par exemple, une différence entre deux ensembles peut être hautement significative avec des données inadéquates à l'objectif que l'on s'assigne.

Toute constitution d'ensembles, toute condensation de données pour une synthèse, tout calcul de paramètres doivent pouvoir être critiqués, améliorés (par addition de données nouvelles, par un choix d'ensembles plus pertinent, par un calcul mieux ajusté, par un assemblage plus complet, ...) et ceci sans arrêt ; il n'y a pas de fin à la modélisation, pas de fin à l'amélioration des synthèses. Toutes ces opérations (développées au chapitre VI) conduisent à des Données Secondaires Elaborées qui doivent également être correctement gérées comme autant d'étapes de la synthèse écologique.

Accessibilité et mobilité des données criliquement identifiées sous-tendent toutes interprétations quelles que soient leurs modalités particulières.

En définitive, l'écologie, pour être une science à part entière, exige que les DICs, qu'elle acquiert, interprète et ré-interprète, soient accessibles, explicites et réutilisables.

- Accessibles à l'interprétation et la ré-interprétation exige concrètement que leur restitution soit quasi instantanée.
- Explicites, c'est-à-dire qu'à tout instant les données peuvent être comprises quant à leur nature intrinsèque et extrinsèque (= position dans tout système, écologique ou non, auquel elles sont liées). Grâce au référentiel des données leurs situations sont connues et au descriptif technique d'analyse (DT, p. 268) leur caractéristique exacte est contrôlable.
- Réutilisables en ce sens que, les deux premières conditions étant satisfaites, la donnée puisse être réorganisée dans tout nouvel ensemble au gré des besoins.

Geci implique une méthodologie systématique d'énoncés des relations levant toute opacité résultant des particularismes des disciplines concourant à l'écologie.

Une DIC doit être disponible, comme atome de connaissances, et explicitée par ses relations, totalement indépendamment des conditions qui ont motivé son acquisition.

On ne peut fonder une science sur un discours qui n'apporte pas ses "preuves", sans que les conclusions puissent à tout instant être vérifiées ou réfutées. Que les données fussent acquises pour des raisons "fondamentales" (motivées par un besoin de combler une méconnaissance jugée importante par elle-même) ou appliquées (motivées pour des raisons socio-économiques), par quelque universitaire ou chercheur d'institut technique, elles doivent être accessibles, criticables, réutilisables : elles ne peuvent rester bloquées dans les feuillets d'un tiroir ou le jargon d'une discipline.

Sur ce point, un difficile problème n'a pas encore reçu de solution -quoiqu'il soit, aujourd'hui soluble. J'ai décrit, paragraphe 5.2.5., l'extrême limitation où l'on se trouve de publier les résultats scientifiques complexes, donc les résultats vraiment écologiques. Il y a impasse éditoriale.

Il est clair que publier c'est rendre public. Tout écologue publiant des résultats de recherche doit rendre accessible la base objective de son étude (les DICs) et les

modalités d'interprétation - qui, dans Les formes modernes, sont concrètement des logiciels souvent très complexes (et coûteux).

L'impossibilité matérielle d'encombrer la littérature imprimée de tableaux de DICs (pouvant dépasser plusieurs millions de caractères) et de programmes informatisés d'une part, et d'autre part, l'impossibilité de mettre en oeuvre ces données sous forme réutilisable, rendent totalement irrationnelle la publication par imprimerie des bases scientifiques objectivement réfutables de l'écologie.

Actuellement la transmission bâtarde par l'imprimerie ne permet plus la réfutation des résultats, car leurs fondements ne sont plus transmis. Le problème est grave, mais pourrait être résolu par une méthode duale :

a) une publication imprimée courte des objectifs d'une recherche et de ses conclusions accompagnée des références télématiques validant seules cette publication d'affirmations,

b) une publication sur support informatique des DICs associées à la publication imprimée et des logiciels permettant d'arriver aux DSEs éventuellement citées comme preuves conclusives des résultats.

Les deux supports forment une publication - accessible donc au public présent et futur pour toute critique- donc constituent un ensemble à conserver.

En conclusion,

1) L'interprétation exige une conservation des données qui doit porter sur les données initiales. Des valeurs élaborées, comme les paramètres d'une fonction, les moyennes ou le résultat d'une simulation mathématique, découlent, s'ils relèvent du domaine scientifique (vérifiable, réfutable), de données initiales. Il faut donc d'abord et essentiellement saisir et conserver les DICs.

2) Les DICs doivent être corrigées des aberrations (différent de précision, p. 289) dues aux aléas de l'obtention des données (à ne pas confondre avec les conséquences des options d'acquisition : techniques d'analyses et position dans l'espace-temps, qui n'entachent pas la donnée par elle-même).

3) La Donnée Initiale Corrigée, n'ayant seule aucun sens, doit être liée par le référentiel des données au champ écologique et aux conditions d'acquisition.

4) La saisie de données doit être possible pour toute donnée, y compris isolée, particulière, inattendue. Le principe d'économie implique celui de non perte. En outre, l'inattendu est souvent à l'origine de découvertes fortuites.

5) Une co-publication, à la fois informatique et traditionnelle, reste à élaborer pour permettre une réfutabilité des recherches écologiques par l'accès télé-informatique à toute DIC, DSE, voire DEP et aux logiciels de traitement ayant permis l'interprétation.

5.4.4. Les fichiers et le problème multidimensionnel des relations écologiques

Traditionnellement les informations acquises sont stockées dans des fichiers où des relations peuvent être décrites entre deux ensembles de caractéristiques ; les "lignes" et les "colonnes". Des prélèvements de i_1 à i_n sont présentés horizontalement et leurs caractéristiques verticalement de j_1 à j_n , dans un tableau $I \times J$.

Un seul type de relations (deux à deux) peut ainsi être décrit alors que toute donnée est en fait liée à d'autres caractéristiques (p. 265). Par exemple, le taux d'azote d'une feuille d'arbre est lié directement à la technique de dosage, à l'unité d'expression, à l'expérimentateur, à l'étudiant, à la feuille et par la feuille à l'individu, à l'espèce de l'individu, à la coordonnée temporelle, aux coordonnées spatiales,...

Il en est ainsi de toute donnée. Le travail sur fichier est donc très difficile car quel que soit le choix des ensembles I et J , ce choix est un cas particulier et les données doivent être constamment ré-arrangées pour faire apparaître les divers liens possibles.

En écologie les fichiers informatiques ont souvent entre eux des éléments communs, c'est-à-dire des assemblages possibles de données (données qui appartiennent en fait pour l'écologue à de mêmes sous-ensembles ou ensembles). Ces relations sont difficilement exploitables du fait qu'elles sont enregistrées isolément, indépendamment les unes des autres, en de nombreux fichiers.

Il faut alors effectuer une recherche des fichiers ayant l'information souhaitée (dans quel pays ? dans quel organisme ? sous quelle organisation ?). Puis de multiples manipulations de données sont nécessaires pour reconstruire de nouveaux fichiers. Ces manipulations toujours très contraignantes limitent en fait l'accès aux informations. Elles se font *a posteriori*, après constitution des fichiers qui n'ont pas été structurés pour que cette démarche soit automatique. En outre, de nombreuses données sont éliminées après usage.

L'écologue doit successivement avoir des visions analytiques, synthétiques et globales de données liées entre elles dans le champ écologique, voire informant sur le domaine socio-économique. En d'autres termes, il peut être conduit à exploiter des fichiers très divers, à rechercher des informations fort dispersées, à associer des ensembles "imprévus" de données : les classiques fichiers, même accumulés dans d'importantes Banques de Données, ne permettent pas un accès rapide, voire un répertoire efficace, de l'information. L'une des raisons est leur caractère séquentiel. Chaque fichier a une raison d'être indépendante des autres et souvent des normes qui lui sont propres. Il est notamment indispensable de connaître *a priori* la nature de leur contenu pour aller "rechercher" les données pour une restitution. En schématisant, le support informatique "ignore" l'adressage des données et des ensembles de données.

Ceci est contradictoire avec l'objet d'étude de l'écologie, l'écosphère, susceptible de fournir des données infiniment nombreuses et articulées entre elles de façon continue : tout isolat dans un fichier est un artefact écartant de l'objet d'étude. Dans un fichier l'information est ordonnée mais figée, cloisonnée et isolée.

Il y a lieu ici de bien distinguer les masses de données accumulées sur documents pré-informatiques ou sur fichiers informatisés selon des modalités classiques (c'est-à-dire séquentielles et de façon conceptuellement et sectoriellement bornée) et les données accessibles de façon logique, en satisfaisant non seulement les exigences de l'informatique moderne mais également celles de la science écologique (c'est-à-dire l'accès à tout élément de la globalyse) et des exigences mathématiques, (c'est-à-dire de la logique).

Des gestionnaires de fichiers (type DBase 4) ont récemment permis de faciliter les manipulations de ceux-ci pour qu'au niveau quasi-individuel le manipulateur qui sait les liens puisse les établir rapidement et réorganise à ce niveau personnel (parcellisé) ses données. L'objectif "transdisciplinaire" des échanges n'est pas atteint en raison de l'absence d'une SGBD optimisant automatiquement les voies d'accès aux données. WILDL (1986) illustre à propos des relevés phytosociologiques les limites de ces gestionnaires de fichiers à la fois intrinsèquement <<Only large Systems can manage arrays of very big size. It follows from this that data banks in synecology require powerful machines and programs>> et extrinsèquement : que faire de relevés phytosociologiques hors leurs contexte écologique ?

L'existence de logiciels de Base de Données devenues totalement Relationnelles permet aujourd'hui à l'écologue de satisfaire cette nécessité fondamentale de sa discipline : une restitution "inconditionnelle" et rapide des données, en permettant de transposer la donnée obtenue depuis le champ écologique par acquisition (chap. IV) sur un support informatique "internalisant" les liens de son référentiel (p. 296).

L'émergence des Bases de Données est permise par des logiciels (Systèmes de Gestion de Base de Données) aujourd'hui adéquats, opérationnels et Relationnels (ou

SGBDR). A ces SGBD(R) est associé un ensemble de concepts précis décrits par un langage univoque. Je m'appuierai ici essentiellement sur l'ouvrage de DELOBEL et Adiba (1982) qui ont proposé une démarche rigoureuse centrée sur l'approche relationnelle des Bases de Données. Pour plus de précision, je renvoie à cet ouvrage en m'efforçant ici de présenter à l'écologue, fondamentaliste, agronome ou environniste, l'importance de ces outils permettant de valoriser l'approche logique de l'acquisition des données décrites au chapitre IV. Cette approche a pu être pratiquée grâce à la mise à disposition récente d'une SGBDR opérationnelle à Montpellier (1985) et au travail d'équipe de notre laboratoire où P. SOTÛ a assuré la mise en oeuvre technique de la Base de Données Relationnelles ECORDRE et R. AL1AGA la gestion des saisies (p. 321) et l'exploitation par requêtes.

5.4.5. Les bases de données

1. Introduction

Une Base de Données est un ensemble structuré de données enregistrées sur des supports accessibles par l'ordinateur pour satisfaire simultanément plusieurs utilisateurs de façon sélective et en un temps optimisé. Elle enregistre les données et les restitue à la demande (= requête), soit sous forme initiale, soit en rapprochant plusieurs faits élémentaires les uns des autres.

Par exemple, on peut enregistrer les poids individuels, donc le nombre d'individus appartenant à différentes espèces ayant été observées sur divers volumes de sol appartenant à diverses placettes expérimentales où divers traitements ont été effectués, ces espèces appartenant par ailleurs à différentes catégories écologiques.

Le logiciel permettant l'interaction avec une base est un SGBD (Système de Gestion de Base de Données) ; il permet :

- a) la description des données rangées dans la base, de façon logique par l'utilisateur,
- b) l'utilisation de la base pour retrouver certaines données et, éventuellement les modifier,
- c) la protection de l'intégrité de la Base de Données en écartant l'enregistrement des données ne respectant pas des règles pré-indiquées. Dans notre exemple, on pourra vérifier que les individus d'une espèce ont des poids compris entre les bornes naturellement observées (= repère des données aberrantes),
- d) la confidentialité permettra, si nécessaire, de limiter l'usage de certains utilisateurs à une partie des données,
- e) de traiter successivement des demandes simultanées par deux utilisateurs (concurrence d'accès),
- f) la sécurité de fonctionnement en cas d'incidents sur le logiciel ou le matériel.

Une Base de Données est représentée de diverses manières :

- 1) Le niveau interne a trait à la réalité physique (supports de données, logiciels) ; c'est évidemment le domaine de réalisation des bases par les informaticiens.
- 2) Le niveau conceptuel est fondamental pour l'écologue, car il porte sur l'architecture d'une Base de Données. Cette architecture, pouvant être contraignante, doit guider le choix du SGBD. Ce choix étant fait, une personne ou une équipe, dénommée "administrateur" de la Base de Données, réalisera le schéma conceptuel en conciliant les contraintes informatiques et les applications projetées.
- 3) Le niveau externe est celui auquel, en pratique, l'écologue accèdera avec la complicité de l'administrateur de la Base de Données. Il s'agit d'établir le schéma d'utilisation de la base par chaque utilisateur de celle-ci. Chacun ne dispose alors que d'un schéma externe de la Base limité à ce qui est de sa propre compétence. Ce schéma d'accès limité peut par exemple définir le domaine de travail d'un étudiant en thèse. Ces modes d'emploi restreints jouent le double rôle de faciliter l'accès à la base en évitant d'en aborder toute la complexité et de limiter, au seul domaine ouvert à l'utilisateur, l'accès pour des raisons de sécurité des données, voire de confidentialité.

2. Indépendance des niveaux logique et physique

Pour l'écologue, il est essentiel que le niveau logique, exprimant au niveau de la base la structure relationnelle qu'il perçoit. Cette structure doit être indépendante de l'organisation physique de la base c'est-à-dire des supports de données et des voies de rangement et d'accès. En d'autres termes, il lui faut pouvoir décrire les liens logiques multidimensionnels entre données, ou entre données et ensembles, et ensembles entre eux, avec liberté, sans avoir à tenir compte de la structure des logiciels et matériels informatiques. Ceci n'est possible qu'avec certaines SGBD.

Par ailleurs, il faut décrire logiquement les relations, ne serait-ce que pour éviter une constante remise en cause (y compris des programmes d'application). Toutefois, cette élaboration écologique est constamment évolutive et s'applique à un domaine en principe non borné : il faut donc un niveau conceptuel externe fondamentalement ouvert (p. 322). Il est également essentiel que le logiciel de SGBD choisi ne contraigne pas à une remise en cause de la structure logique de la Base au cours de ses évolutions ; en d'autres termes que ce type de SGBD présente des propriétés adéquates avec les données, même futures.

3. Les types de Systèmes de Gestion des Bases de Données

Les Bases de Données sont destinées à permettre un accès rapide de l'information. Historiquement ces bases ont succédé aux systèmes de cumulation de données (Banques de Données) (SCHLAGETER et STUCKY, 1977). Elles ont été d'abord des Bases de Données hiérarchiques, puis des Bases de Données en réseaux, enfin des Bases de Données Relationnelles.

Les Bases hiérarchiques organisent de façon figée les données en les hiérarchisant et permettent par des liaisons arborescentes d'accéder du plus général au plus détaillé, ou inversement de condenser des détails.

Les relations sont de type 1 - n de façon exclusivement linéaire en suivant un parcours hiérarchique $1 \rightarrow n$, $1 \leftarrow n$. Les bases hiérarchiques mettent en oeuvre une hiérarchie cumulaire et excluent les hiérarchies systémiques (p. 94). Elles obligent en outre de connaître *a priori* cette hiérarchie cumulaire.

Les bases en réseaux marquent un progrès important en permettant des relations "transversales" entre éléments de l'arborescence. Les données sont décrites dans une structure préalablement choisie sans être obligé à une hiérarchie cumulaire. (On peut aller de 1 à n mais aussi de n à m). Toutefois, ici encore il faut connaître *a priori* la structure de classement des données. Cette structure constitue ensuite un cadre rigide contraignant.

Bases de données hiérarchiques et en réseau ont en commun d'être des structures figées choisies préalablement au chargement des données. Il n'y a pas indépendance entre la structure logique de l'utilisateur et la structure physique des logiciels d'exécution. Comme les fichiers, ces Bases doivent être modifiées et souvent profondément transformées avec l'arrivée de données initialement non envisagées ou par la remise en cause du classement choisi.

Elles ont, vis-à-vis de la recherche, toujours incertaine, un caractère illogique puisque le choix d'une hiérarchie ou d'un réseau résulte de l'interprétation des données et que normalement cette interprétation se fait après exploitation de la Base et ne peut donc être connue avant sa réalisation.

Même en admettant le problème résolu par des études préalables optimisant le choix des réseaux ou hiérarchies, tout progrès scientifique remet nécessairement en cause ces structures (p. 357). Congénitalement, ces deux types de Bases contiennent donc une structure inadéquate à la démarche écologique ; elles permettent l'adressage des données mais non l'évolution de la Base.

Les Bases de Données Relationnelles sont constituées par les relations entre données c'est-à-dire les liens qui organisent ces données. Il n'est pas nécessaire au moment de la création de la Base et de son développement de décrire *a priori* la structure et les limites de la Base. Pour obtenir des données, on effectue une requête et c'est le logiciel qui, en suivant les relations décrites, retrouve et fournit les données souhaitées à partir du stock de données introduites.

Les liens sont de quatre types :

1) binaire (1-1)

Exemple : Lieux-(espèce dominante)-espèces végétales

2) hiérarchique (1-n)

Exemple : Lieux-(liste floristique locale)-espèces végétales

3) dépendant (n-1)

Exemple : Lieux-(aire de répartition)-espèces végétales

4) maillé (n-m)

Exemple : Lieux-(association végétale)-espèces végétales

Autre exemple : les interactions trophiques

Consommé-	-Consommateur	Exemples
1- (monophagie)	-1	<i>Ctenophthalmus bisoctodentalus</i> et <i>Talpa europea</i> (la taupe et sa puce)
1- (cortège parasitaire)	-n	Le chêne alimente plus de 200 espèces parasites, herbivores, gallicoles, etc.
n- (polyphagie)	-1	Le renard se nourrit de fruits, lapins, lombriciens...
n- (herbivorie)	-n	Les 40 à 50 espèces végétales d'une prairie sont exploitées par les Diptères, Coléoptères, Vertébrés (lapins, vaches, campagnols, etc.)

La seule "contrainte" est de décrire les relations, c'est-à-dire pour les écologues les liens entre données. Remarquons, sur la base des arguments développés aux paragraphes 4.2.1. et 4.6.4., qu'il ne s'agit pas en fait d'une contrainte, mais d'une garantie car toute donnée écologique est par nature liée à son prélevé (prélevé ou intercepté) qui est nécessairement situé dans le Champ écologique dont l'espace-temps. L'information relative aux liens est ainsi présentée.

A la différence des gestionnaires de fichiers, la Base exige une description (et une seule) de toute information avant son chargement. Ensuite, la Base gère automatiquement l'information sur la foi de cette description et ceci vis-à-vis de n'importe quelle requête.

De ce point de vue, une Base de Données Relationnelles (BDR) ayant une indépendance entre les niveaux logique et physique est le système de gestion optimal pour emmagasiner toutes données écologiques. Ce type de Base ne contraint qu'à décrire la structure relationnelle du champ écologique.

Si la BDR libère l'écologue en le rendant à sa logique, elle le responsabilise en l'obligeant à être logique. Il est toujours aisé de créer un fichier pour son usage personnel et temporaire en y accumulant des valeurs ; *a contrario* une compétence est nécessaire pour indiquer dans un langage univoque écologique dans la Base les liens qui relient les données (valeurs). Heureusement, les BDR facilitent la formalisation en fournissant une méthodologie évolutive et permettent l'élimination des redondances, et nous verrons en bilan de cet ouvrage que le lexique écologique opérationnel est fort simple (p. 564). Enfin, nous verrons avec l'application

ECORDRE que le niveau conceptuel aboutit en écologie à un schéma unique : progrès essentiel (p. 322).

Le choix de la SGBD entraîne ipso facto le choix du langage informatique de description des données et d'un langage de manipulation de données.

4. Introduction des données dans la base : énoncé des relations

Les données étant acquises, elles doivent être décrites dans une BDR en terme de relation, une relation étant l'énoncé des liens entre les identificateurs, les valeurs et les choses décrites.

L'une des difficultés lors de cette introduction de données résulte très souvent de la malpratique consistant à interpréter avant l'entrée dans la base, par exemple de ne retenir qu'une moyenne établie à partir de données prises en des points voisins de l'espace-temps ; il y a perte d'information sur la diversité des données et sur l'origine des données (position dans le champ écologique).

11 est indispensable de conserver les DICs (p. 290), d'éviter leurs pré-interprétations et d'une façon générale il faut respecter les principes d'optimisation à l'acquisition des données (p. 298). Il est même préférable de ne conserver que les DIGs, ce qui n'exclut pas des sorties condensées pour des pré-interprétations standards (p. 331).

Les données usuellement sous entendues constituent également une deuxième difficulté. Par exemple, dire que le rendement agricole d'une parcelle est de 70 quintaux/ha implique en effet qu'il s'agit de grains de blé, exportés du champ par an (et non de grains présents dans la parcelle), et produits dans un volume dont on a intrapolé la dimension verticale Z. Il s'agit de cotes négligées (p. 277). Une procédure d'énoncé relationnel (p. 296) peut être donnée en amont de la Base pour obliger, par exemple par un questionnaire sur papier ou sur écran, à l'expression des liens qui existent obligatoirement dans un système écologique (référentiel des données, p. 296). L'administrateur de Bases évoluées dispose d'une approche méthodologique qui permet de structurer l'information en s'appuyant sur des propriétés logiques, telles les formes normales ; par ailleurs, il peut au fur et à mesure du développement de la Base (acquisition de nouvelles données appartenant à de nouvelles caractéristiques) introduire des sécurités permettant de protéger l'intégrité de la Base.

D'une façon générale, les critères de sécurité implantés sur la Base doivent être arrêtés et mis en oeuvre dès la saisie des données. Il y a en effet très souvent dans les travaux d'écologie une importante dissociation opérationnelle entre le lieu de collecte des prélèvements, la date de saisie des données et l'introduction dans la Base ; par ailleurs les personnes assurant ces opérations sont souvent différentes.

Autant il est souvent facile, au moment de la saisie, de transformer les données brutes en DICs par des corrections adéquates restituant sans perte d'information des données correctes, autant il est parfois impossible d'assurer l'élimination des données erronées *a posteriori*. L'ensemble des opérations d'acquisition forme un tout qui doit être assuré si possible sans discontinuité jusqu'à la prise en charge totale dans la Base. L'alimentation d'une Base de Données par un flux d'informations issu du champ écologique implique donc l'élaboration d'un processus de collecte, analyse, saisie, chargement de la Base, peu à peu optimisée par un choix adéquat de procédures assurant la correction et l'énoncé relationnel, puis l'intégrité des tableaux de données.

5.4.6. Une application à l'écologie : ECORDRE

1. Circonstance de la mise en oeuvre

La base ECORDRE, développée par le laboratoire de zooécologie du sol, résulte de la convergence de trois facteurs :

- la pré-existence d'une accumulation "a-disciplinaire" de données,
- l'optimisation, anciennement entreprise, d'une élaboration écologique sous-tendue par un essai de schéma logique,
- l'implantation au Centre National Universitaire Sud de Calcul (CNUSC) d'une SGBD convenable, c'est-à-dire relationnelle (R),
- enfin, et surtout, un travail conceptuel d'équipe informatisable.

Les données, disponibles sur fichier, découlaient de l'activité du laboratoire : l'étude écologique et agronomique des lombriciens. La rareté des recherches sur ce sujet oblige en un même laboratoire à des travaux très divers de zoologie descriptive et d'écologie mésologique (BOUCHE, 1972), mais aussi à la quantification de peuplements, à la mesure écophysiological de certaines fonctions, et ceci tant dans des situations écologiquement équilibrées (vieilles prairies ou forêts) que sous l'impact, d'actes humains diversifiés (parcelles agricoles, prairiales ou forestières, zones contaminées, ...).

Les lombriciens, par leur nature même, conduisent, dès que l'on ne veut pas s'abstraire arbitrairement de la nature, à enregistrer des données sur le sol, le climat (pédoclimat), la végétation, l'activité microbienne et la nécromasse. Leur présence permanente interdit la seule prise en compte de quelques actes puisque, en pratique, ils sont soumis à toutes les pratiques aratoires, ou forestières, à tous les pesticides ou toutes les charges polluantes, etc.

Autour d'un axe de recherche principal allant des fondements aux applications agronomiques et environnementales, cette situation n'a évidemment permis que l'amorce des études nécessaires, limitées aux moyens circonstanciels. Néanmoins, les données acquises offrent une grande diversité, rendant nécessaire une intégration, et se prêtant à tester l'universalité du schéma conceptuel unique spécifiquement développé pour l'usage d'une SGBDR appliquée à l'écologie.

Il est en effet apparu rapidement que le schéma d'ECORDRE, développé pour les besoins propres du laboratoire, pouvait convenir à l'écologie en général, tant appliquée que fondamentale.

Tester l'universalité d'une telle Base revenait à vérifier la possibilité de rendre disponible toute donnée (strictement) écologique à tout écologue ; de rendre possible la réfutation ultérieure rigoureuse des interprétations, même non séquentielles ; en conséquence, d'affranchir l'écologie de sa fragmentation en la rendant simultanément globale et scientifique ce que, par définition, elle devrait être.

Les moyens très limités du laboratoire, proportionnellement à son objet d'étude, ont également conduit à une optimisation de l'élaboration visant à l'usage et au ré-usage des rares données écologiquement valides et disponibles.

Notamment l'énoncé, déjà ancien, de quelques concepts d'écologie générale s'est avéré très important pour une BDR écologique, tels ceux de prélèvements, métabolismes, intrapolation... Le développement, strictement limité au domaine écologique, d'une approche conceptuellement formalisée sous forme d'un modèle factuel et transportable (REAL, p. 406), complétait par ailleurs ce contexte opérationnel. Ce dernier point devient le préalable au développement de la Base de Connaissances d'un Système Expert, ROLUMBRIC, interfaçable sur ECORDRE (p. 431).

Dans ce contexte l'implantation au cours de l'année 1985 de la SGBDR "SQL/DS" (Structured Query Language/Data System) développée par ASTRAKAN *et al.* pour IBM (1981) constitue le moyen de valoriser ces données. Un travail d'équipe

important, où P. SOTO assure l'application informatique et l'administration de la base de données et R. ALIAGA développe les schémas externes appliqués aux essais du laboratoire, a donc été entrepris et est présenté à titre d'exemple de l'application de cet outil (SOTO et BOUCHE, sous presse).

Le logiciel de gestion de la BDR "ECORDRE", SQL/DS fonctionne sous VM lui-même un logiciel essentiellement basé sur l'interactivité relayé par un logiciel conversationnel (CMS) permettant une utilisation directe par le terminal du (des) utilisateur(s).

Un logiciel spécifique (QMF) permet de formuler les requêtes en mode interactif (= demande précise spécifique) pour obtenir des données gérées par le logiciel SQL/DS. L'utilisateur dispose d'un système de menus qui le guide dans ses tâches par des clés de fonctions limitant les erreurs et facilitant l'apprentissage de cet usage.

Plus récemment l'implantation d'un logiciel Système-Expert, EM1CAT, fonctionnant également sous VM, permet l'interfaçage d'un tel Système-Expert avec ECORDRE.

2. Structure logique des relations : le Schéma Conceptuel Unique

La structure fondamentale de la Base est fondée sur le concept de champ écologique, celle-ci étant destinée à recevoir toute donnée de la globalyse (p. 37) de ce champ acquise par un quelconque écologue. Si la nature des données dépend des options opérées par chaque chercheur, les DICs sont nécessairement liées entre elles par le référentiel des données (p. 322). Ce référentiel permet les liens aux trois référendaires c'est-à-dire les repères dans l'espace, le temps et les relations permettant de préciser la composition de la DIC et de son prélèvement grâce à ces cotes et aux associations par identificateurs ; il permet aussi les liens aux motivations.

Le fondement conceptuel d'ECORDRE s'appuie donc sur la structure des trois référendaires écologiques (espace, temps et composition, p. 37) permettant de situer toute DIC, indépendamment des hypothèses (options et propositions). Chaque DIC est ensuite référée à son prélèvement et à sa technique d'analyse grâce au descriptif technique.

Outre cette organisation théorique générale, il faut prendre en compte les aspects pratiques, tant de globalyse des DICs que d'administration des données (DICs et DSEs). C'est ce que nous allons illustrer avec des exemples concrets ci-dessous.

Au plan tant fondamental qu'appliqué, la BDR exige un langage univoque, chaque attribut de celle-ci étant désigné par un nom qui doit être compris dans un sens unique, ce sens n'étant désigné que par ce nom.

Ici toute la rigueur sémantique de la nomenclature univoque que j'ai proposée, au chapitre IV notamment, est indispensable.

Elle ne saurait suffire car au plan pratique, il est souvent nécessaire d'adopter des ajouts exigés par la nécessité de ne pas imposer lors de l'acquisition des données des contraintes supplémentaires. Une Base de données écologiques doit en effet idéalement recevoir toute DIC, puis permettre à partir de celles-ci toute interprétation (chapitre VI) et gérer éventuellement les DSEs issues de ces DICs. Par contre, elle ne doit pas être une contrainte au niveau de l'acquisition. L'expérience a montré que, à la manière d'une gestion informatique en fichiers classiques qui oblige déjà à une mise en ordre, la base ECORDRE impose en outre un respect scrupuleux du principe d'indépendance des DICs vis-à-vis de l'interprétation.

3. Les références spatiotemporelles

Toute donnée acquise provient d'un point de l'espace et en principe les coordonnées géodésiques devraient permettre de repérer une donnée en un point. En pratique, il est difficile d'obtenir une précision inférieure au décimètre, voire à l'hectomètre et ceci revient à subdiviser la situation en suivant les étapes du référentiel

des données. Le concept de lieu permet de situer ce qui est géodésiquement repérable : en pratique cela peut être une ferme, quelques parcelles ou un picstel d'information satellitaire, ... En raison du fait qu'un certain nombre de difficultés pratiques existe (imprécision des cartes, connaissance sur document de la seule localité administrative, ...) un code de "précision" est souvent associé aux relations.

Dans un lieu donné, la placette constitue le prélèvement majeur, il donne les informations d'une portion d'espace (souvent décamétrique ou hectométrique) dont les caractéristiques ne seront pas détaillées plus avant. Cela peut être dû à un manque de résolution (le picstel de télédétection d'un satellite), à la conséquence d'actes techniques (la placette ayant reçu un traitement de 1 200 g MA/ha de Benomyl), ou au choix d'un niveau d'analyse (la placette "pinède" opposée à la placette "prairie").

À l'intérieur d'une placette, pour des études plus fines, des plots peuvent être repérés par des repères.

Ces plots peuvent être, par exemple, des relevés de végétation, des prises de sol, des implantations d'anémomètres, des sondes pédologiques, des positions de pièges ou de carottage.

On peut repérer enfin à l'intérieur d'un plot des mésoplots, microplots, picoplots. Ainsi, toutes les données sont rapportées, par un emboîtement gigogne, à l'écosphère (fig. 4-4, p. 293).

En raison des variations microtopographiques la coordonnée altitude est décrite dans une localisation plus précise que le lieu, usuellement avec la relation placette ; elle pourrait l'être si nécessaire à celle des plots.

La situation de chaque prélèvement est affectée d'une date liée à la donnée de la caractéristique. Une même caractéristique peut être prélevée à plusieurs dates successives avec les mêmes coordonnées spatiales ; c'est donc à la relation donnant la date que les valeurs des caractéristiques du prélèvement sont liées.

Lorsqu'elle est enregistrée la durée peut être indiquée de diverses manières qui dépendent du choix des unités et de la référence au mode de prélèvement. Par les unités, on indique directement la donnée en fonction du temps (nombre de mètres/secondes pour la vitesse du vent, nombre de litres/mn pour un débit, nombre de mn/ha pour le temps d'exécution d'un acte agronomique). Dans le cas d'enregistrements en continu par des interceptions cumulatives (pluviomètre, trappe, collecteur de litière, etc.), la durée est enregistrée et la date finale de la durée constitue, par convention et par commodité, la "date" du prélèvement, alors que la date moyenne est antérieure de durée/2. Chaque donnée, liée à une caractéristique, est reliée à un prélèvement (placette, plot, microplot, ...). La situation des prélèvements est donc décrite par une relation pour chaque prélèvement, la placette ou bien le plot dans les coordonnées placettes, etc. Les cotes des prélèvements sont enfin indiquées comme attributs de ceux-ci.

Toutefois aucune donnée spatiotemporelle, si ce n'est de situation au lieu, n'est obligatoire. Un prélèvement peut être informel et unique dans un lieu ; c'est l'information minimale permettant de situer les données issues des caractéristiques étudiées dans l'espace-temps de l'écosphère.

De la même manière que toutes les données de toutes les caractéristiques coexistantes potentiellement dans un prélèvement ne sont pas étudiées, toutes les combinaisons de l'espace-temps ne sont donc pas décrites. La base ECORDRE peut recevoir des ensembles de données de grande complexité mais la réciproque n'est pas vraie, elle n'exige pas des données complètes et complexes. La simple observation anecdotique conduisant à une donnée fortuite (Ex ; une variété de papillons dans une localité et une date connue) est tout à fait enregistrable.

4. Les références analytiques

Quel que soit le prélèvement on peut en étudier une ou plusieurs caractéristiques donnant chacune une donnée par prélèvement. Chaque mesure d'une caractéristique peut être entachée d'une imprécision qui peut être codée et enregistrée ou encore l'on choisit des unités qui fassent que les imprécisions ("erreurs" sur la mesure) (p. 289) soient inférieures à cette unité.

La diversité des caractéristiques relevées est très grande mais doit surtout respecter le principe d'indépendance vis-à-vis de l'interprétation, ou lorsque cela est "inévitable" en limiter les conséquences (p. 287). Ces caractéristiques doivent impérativement se référer au prélèvement lui-même et non à l'interprétation que l'on envisage de faire de la donnée, ce qui n'est pas toujours évident (cf., par exemple, les actes p. 272).

Chaque caractéristique est issue d'un mode de collecte (relevé, prélèvement, interception-relevé, interception-prélèvement) qui doit être précisé. Elle résulte aussi souvent d'une technique d'analyse révélant quelques caractéristiques co-existantes du prélèvement (exemple : celle des métaux lourds d'une prise). Cette dernière technique ne peut être décrite dans la Base mais une relation spécifique permet de relier la caractéristique à son DT (descriptif technique), elle-même reliée à une bibliographie orthodoxe, voire, dans le futur, à une Base de Connaissance. Toute caractéristique issue d'une technique différente est différente et se réfère à un DT différent.

Ainsi la base ECORDRE peut recevoir toute DIC et refléter l'état de la globalyse quels que soient le niveau de perception et l'échelle des études initiales et ceci indépendamment des objectifs (p. 267) justifiant les acquisitions de données. Cette indépendance est fondamentale pour le multi-usage des données (p. 307, 314).

5. Les références de motivations

La pratique de la recherche écologique est à la fois une oeuvre individuelle et une entreprise collective. Les données coûtent cher à acquérir et sont valides sous la responsabilité individuelle de leur inventeur. Les DICs sont la base objective et le terme de passage obligatoire de l'objet concret à toute interprétation et le fondement de tout contrôle collectif exercé par la communauté scientifique.

Ces dualités, entre individuel et collectif, entre propriété réservée et publication, se retrouvent dans ECORDRE qui assure la confidentialité nécessaire avant publication. Ajoutons qu'une telle Base, pouvant recevoir toute donnée écologique, est conçue pour être utilisée simultanément par de nombreux intervenants. L'accès à la Base est donc un aspect qui ne peut être éludé.

Nous venons de voir, paragraphe 5.2., la très grande difficulté de rendre possible le contrôle effectif de démarches d'interprétation portant sur des centaines de milliers de données interprétées et ré-interprétées par un multi-usage résultant des deux Processus Répétitifs d'Accroissement des Connaissances (p. 357, 424) et conduisant à de véritables impasses éditoriales des résultats (p. 305).

En pratique, il faut donc administrer les opérations de recherche dès leur formulation en objectifs. Classiquement, un objectif peut être celui du sujet de thèse d'un jeune chercheur, mais cela peut apparaître avec la nécessité de classer un ensemble d'informations disparates lors de la constitution de la base. Ceci est assuré sous le nom de réalisation, chaque chercheur-thésard étant responsable de sa réalisation et des ensembles identifiables de données préexistant en dépendant. Ces réalisations sont numérotées (R1, R2,..... Rn). A l'intérieur de ces réalisations le thésard peut organiser librement son travail en conduisant des essais variés qu'il numérote librement (R121/001, R121/002, ...) de sorte que tout ensemble de données, quel que soit son objectif initial d'acquisition, peut être identifié également par son auteur et sa motivation détaillée (liés à la réalisation ou/et l'essai).

Au cours de l'acquisition des données (et du travail de thèse) les données sont formalisées et saisies sur fichier d'ordinateur avec l'aide d'une procédure d'énoncé relationnel (p. 296) préparant l'entrée en Base de Données. Ainsi, au laboratoire, l'identification en série des lombriciens et leur pesée individuelle sur une balance électronique raccordée à un microordinateur est une routine qui s'accompagne obligatoirement d'un énoncé des cotes du prélèvement, de sa situation, de la placette, de la réalisation et de l'essai. Les fichiers, ainsi décrits avec leur contexte, optimisent le transfert ultérieur dans ECORDRE.

L'usage du microordinateur peut s'avérer très commode au cours des diverses phases analytiques de l'acquisition, des contrôles préparant la gestion en base. Les fichiers des futures DICs (après contrôle des aberrations et erreurs) étant constituables n'importe où.

Le responsable de la Base assure le développement du schéma conceptuel sous forme de relations explicites en tableaux tenant compte, comme décrit ci-dessus, de la structure logique des relations, des références spatiotemporelles, des modalités analytiques, des références de motivations, donc des numéros de réalisations et d'essais et du responsable d'acquisition des données. Ainsi, il prend en charge le contexte d'acquisition en totalité qui étant décrit par un énoncé, permet ensuite le chargement des données dans la Base depuis les fichiers.

ECORDRE étant conçue pour recevoir des données très diverses, issues de disciplines différentes, le responsable de cette Base peut donner un accès direct à divers utilisateurs. Toutefois, pour maintenir la cohérence et l'intégrité de la Base, il n'accorde ces privilèges que de façon sélective en n'attribuant qu'un secteur de la base (celui qui concerne un responsable d'acquisition d'un certain type de données, par exemple relatives aux études associées à des nids d'oiseaux, ou encore relatives aux études sur les modalités d'utilisation de machines agricoles, etc.).

Selon le degré de qualification et d'autonomie de ces utilisateurs ayant un privilège d'accès direct à ECORDRE, cette délégation de pouvoir agit dans et sur un secteur de la Base peut être plus ou moins étendue par le responsable d'ECORDRE. Par exemple, grâce à des restrictions d'accès, l'utilisateur direct ne pourra que sélectionner et sortir des données relatives à son secteur d'intérêt pour les utiliser hors Base. Dans ce cas, la limitation peut être très précise pour un utilisateur limité à une vue spécifique au seul domaine précis d'un utilisateur. Son privilège pourra être par contre étendu à celui de chargement de nouvelles données dans des tableaux pré-existants - voire si possible et nécessaire à des créations de relations nouvelles. Inversement, ces privilèges peuvent être retirés (à la fin d'une thèse, avec le changement d'affectation du travail, ...). Ainsi, le responsable d'ECORDRE tout en maintenant l'intégrité de l'ensemble peut, secteur par secteur, attribuer des privilèges à des utilisateurs à la fois de façon sectorielle et de façon plus ou moins limitée par des restrictions d'usage.

Pour faciliter la gestion de la base, il est aussi possible de regrouper les procédures de commandes dans des ensembles complexes dits "macroprocédures", conservées pour un usage en routine.

On peut par ailleurs à l'interface d'ECORDRE utiliser des langages-hôtes (surtout FORTRAN, PL/1, ...) permettant d'associer des requêtes de données (en SQL) à des calculs plus ou moins complexes, par exemple pour la présentation, en routine, de données sous une forme synthétique usuelle. Ainsi dans un travail, il est toujours possible d'extraire des tableaux de données sous une forme évoluée de façon répétitive.

Certains tableaux de données (DICs ou DSEs) peuvent être "figés" pour être rendus directement disponibles à la demande dans l'état exact où ils étaient au moment de cette opération. Il s'agit de photos. Ces photos, qui doivent être comprises comme des photos d'archives... mais aussi comme des fichiers immédiatement réutilisables, pourraient jouer un rôle important notamment dans la publication scientifique moderne en contribuant à lever l'impasse éditoriale déjà discutée (p. 314).

Rappelons qu'il est en effet aujourd'hui impossible de publier classiquement des résultats écologiques proprement dits (globaux et rigoureusement scientifiques) en donnant toutes les méthodes d'acquisition, gestion ou interprétation des données : il est indispensable d'associer aux publications classiques (sur papier) des références sur mémoires : les photos pourraient être ces références éventuelles (p. 315) figeant les données utilisées dans la publication. En fait, cette possibilité "théorique" est actuellement fortement limitée par le coût des mémoires utilisées et le fait que de telles photos ne sont pas explicitement demandées donc payées. Leur usage dans ECORDRE n'est donc présentement pas permanent mais limité à celui de la période de préparation d'un mémoire ou d'une thèse faisant répétitivement appel à ces photos. On pourrait abaisser le coût des photos plus permanentes en ne conservant que les requêtes-photos en précisant bien la nature des données utilisées dans le cadre du travail, à un moment donné.

Ainsi, toutes données deviennent accessibles... reste le problème de l'ouverture de la Base de données au public. La constitution d'une Base comme ECORDRE est une nécessité impérieuse pour le laboratoire créateur. Elle nécessite un investissement considérable dont légitimement les chercheurs associés à son élaboration peuvent espérer en tirer partie... Il est non moins évident et impérieux de développer une telle Base pour répondre en temps réel aux demandes socio-économiques, parfois prégnantes, qui émergent régulièrement.

6. Enoncé des relations

Dans les paragraphes précédents, l'intérêt d'une base telle ECORDRE a été présenté dans son contexte informatique (logiciel et matériel), par son niveau externe en relation avec les préoccupations d'écologie opérationnelle résultant des modalités d'acquisition de données (chapitre IV) et par les démarches souhaitables pour l'utilisation des connaissances dans une perspective d'intelligence Artificielle du complexe (p. 309).

Pour ECORDRE, le Schéma Conceptuel Unique, liant chaque donnée à sa caractéristique, son prélevât et sa motivation (fig. 4-7, p. 298), permet de rapporter les pratiques externes à une pratique unique (p. 322). Opérationnellement ce niveau conceptuel se traduit par une série d'opérations logiques.

Les données sont organisées en relations qui concrétisent le(s) lien(s) entre deux (ou plusieurs) ensembles d'informations écologiques opérationnelles (p. 88). Il s'agit de tableaux, à ne pas confondre avec un fichier dont il n'a ni la rigidité ni les propriétés de redondance notamment. Il s'agit d'un tableau au sens naturel, familier du terme, par exemple celui des articles scientifiques. Mais en outre les règles de sa composition et de son organisation assurent de nombreuses propriétés aux BDR (p. 317).

Une Base de Données Relationnelles (BDR) est essentiellement composée d'un grand nombre de relations (= tableaux) chacune définie par son nom et la liste des noms de ses colonnes (= attributs).

Par exemple N° 1

CATECOLOG	Code	Denomination
	0	Inconnu
	10	Epigés
	12	Corticales
	15	Straminicoles
	18	Pholéophiles
	etc	etc

En pratique, la relation sera désignée par son seul nom ou avec la liste de ses colonnes (ici CATECOLOG est l'acronyme de catégories écologiques, appliquées aux lombriciens (p. 245).

Par exemple N°2
PLACETTE (NoLieu, CodePlacette, LieuDit, Altitude, Précision)

Les attributs d'une relation sont les ensembles d'informations opérationnelles qui participent à sa formation en tant que "colonnes". Dans l'exemple (2) ci-dessus où il y a 5 attributs : NoLieu = numéro d'ordre du lieu où se trouve la placette. Dans une relation, l'ordre des attributs est quelconque mais chaque attribut doit avoir un nom différent.

Le domaine définit l'ensemble des valeurs d'un attribut.

Les valeurs d'une ligne pour une relation de degré "n" sont dénommées n-uplets.

Dans une relation des attributs différents peuvent avoir les mêmes valeurs.

Par exemple N°3 dans la relation
TAXONLOMBR1CIEN (Code, Genre, Espèce, SousEspèce...)
le nom taxonomique 2661 *Lumbricus rubellus rubellus* sera concrètement représenté par les mêmes valeurs aux attributs "espèce" et "sous-espèce". Il faut donc bien distinguer attribut et valeur car dans une BDR une relation ne peut avoir deux attributs de même nom.

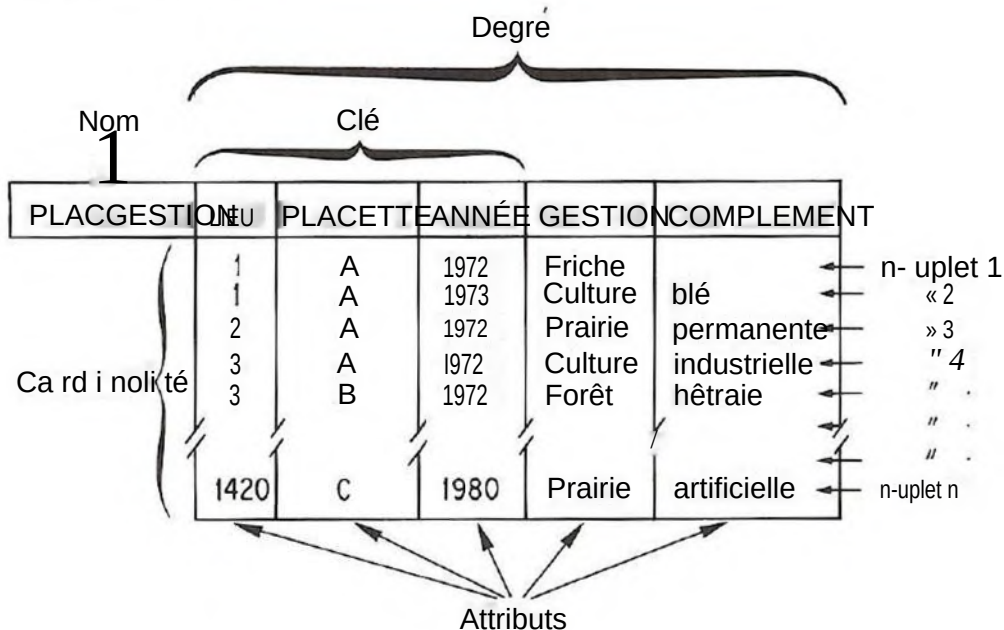


Figure 5-3 - Structure d'un tableau d'une Base de Données Relationnelles ; La cardinalité mesure le nombre de n-uplets, le degré celui des attributs et parmi ces derniers, la clé identifie de façon univoque chaque n-uplet.

Le degré d'une relation est le nombre d'attributs de la relation (la relation PLACETTE exemple n°2 est donc de degré 5). Dans l'exemple N°1 ci-dessus, la relation CATECOLOG présente le duplet (15, straminicoles). La cardinalité exprime le nombre de n-uplets d'une relation (= nombre de lignes d'un tableau). Ces expressions sont importantes car le temps de traitement informatique dépend de la cardinalité et du degré des relations. Les responsables de BDR visent donc à les réduire pour optimiser la base.

La clé correspond à un ou plusieurs attributs (que l'on souligne) identifiant, dans une relation, chaque n-uplet. On vérifie sur cette clé l'unicité de ces n-uplets,

aucun ne devant avoir la même clé (c'est l'identification exclusive des lignes dans le tableau). Dans l'exemple de la relation N°3 TAXONLOMBR1C1EN, la ligne propre à *Lumbricus rubellus rube.llus* est codée par l'identificateur 2661, ce qui implique qu'aucun autre taxon de lombricien n'a ce code.

Plusieurs attributs déterminent la ligne notamment quand il y a hiérarchie cumuleable. Par exemple dans la relation N°2 PLACETTE, chaque placette (par exemple lors d'un essai d'une dose de pesticide, ou d'un traitement forestier, ...) d'une altitude connue, avec une précision connue est identifiée par le numéro du lieu géodésique et le numéro de la placette (impliquant le traitement spécifique). En un lieu il peut y avoir plusieurs traitements (= placettes) mais dans chaque placette qu'un seul traitement et une seule altitude.

7. Normalisation de l'énoncé des relations

Les modalités d'établissement des relations visent à un enregistrement exhaustif et logique des valeurs des attributs, c'est-à-dire de toutes données. Mais celles-ci doivent respecter des normes permettant d'éliminer la redondance de l'information.

La formalisation par ces normes, dites formes normales, est une contrainte d'optimisation de l'usage des relations donc des Bases : cette contrainte est une garantie d'efficacité.

La première forme normale vérifie qu'il n'y a qu'une valeur par attribut pour chaque n-uplet : que l'on a bien un tableau bidimensionnel. Ce n'est pas toujours le cas ; il faut alors "décomposer" l'information en 2 ou n tableaux pour respecter cette norme.

La deuxième forme normale respecte la première et en outre s'assure que les attributs n'appartenant pas à la clé sont définis à l'aide de tous les attributs de la clé et non seulement de certains (= ils dépendent simultanément de tous les attributs de la clé). Il y a dépendance pour chaque attribut hors-clé de la clé définie comme un tout.

Dans la troisième forme normale, on s'assure en outre que chaque attribut dépend directement de la clé et non pas indirectement par une dépendance via un attribut non clé, ce dernier seul dépendant directement de la clé. S'il y a dépendance indirecte (via un attribut non clé) il faut subdiviser la relation.

Une BDR aux relations normalisées jusqu'à la troisième forme normale est proche de l'optimum ; d'autres formes normales sont également possibles et peuvent s'avérer nécessaires pour certaines propriétés particulières.

(les opérations de normalisation visent en fait à une unicité de relation directe et explicite des attributs par rapport à des attributs-clés. Dans l'élaboration d'une BDR, il s'agit d'une étape importante qui 1) révèle en pratique bien des confusions conceptuelles, 2) oblige à une explicitation exhaustive, 3) permet d'éviter les redondances.

En clair, il s'agit de gérer toute l'information mais rien que l'information. Le respect des schémas relationnels oblige à une représentation logique et en outre permet, lors de l'interrogation de la BDR, une voie d'accès et un cheminement efficaces grâce aux liens qui unissent logiquement les attributs entre eux sans avoir à se préoccuper de ce cheminement qui est optimisé par le logiciel. Alors que le travail sur fichier informatique classique avec pointeur n'exige pas les énoncés dénommatifs initiaux des valeurs et ces normalisations, mais oblige ensuite à chaque fois à retrouver l'information puis à écrire des programmes spécifiques d'exploitation, le tableau pour BDR - qui n'est pas un fichier - oblige initialement et uniquement à une normalisation de l'énoncé qui permet ensuite toutes requêtes.

8. Gestion et accès (fig. 5-4)

Les relations d'un chercheur, ou d'une équipe de recherche, avec ECORDRE sont bilatérales. 11 y a possibilité d'exploiter les données pré-existantes dans la Base, ou d'inclure dans celle-ci de nouvelles données au cours des recherches. 11 y a en outre mise en commun de données écologiques objectives (DICs).

Reste les motivations (p. 296). Une donnée a un coût et un propriétaire initial, en ce sens que celui-ci acquiert cette donnée pour une motivation précise et compte, après gestion dans la base, l'employer. Cette donnée peut rejoindre des données pré-existantes de même caractéristique ainsi complète un ensemble.

Les problèmes d'accès aux données touchent donc à la propriété, à la sécurité (une maladresse ou une malveillance pouvant détruire les données d'un tiers) et à la priorité d'usage. Le gestionnaire tient nécessairement compte de ces situations déjà décrites ci-dessus, p. 324).

Par l'intermédiaire de l'affichage de la motivation, qui dans le cadre d'ECORDRE se fait en liant toute donnée à une réalisation (ayant un responsable-propriétaire-initial) subdivisée par le responsable à son gré en essais, il est possible de connaître les introducteurs de données, d'en apprécier la qualité scientifique et d'obtenir éventuellement l'agrément d'usage des données.

La photo est un "instantané" utile conservable en archive, non pas telle quelle, mais plus économiquement sous la forme d'une requête-photo qui pourrait être liée à une publication.

On peut donc avoir dans ECORDRE des données 1) mises à disposition de toute personne, 2) liées à une publication, 3) ouvertes pour un chercheur, 4) enrichies par ce chercheur, 5) exploitées comme données publiques ou après accord des propriétaires.

Chaque chercheur utilisant la base, connaissant la motivation (pour ECORDRE, la Réalisation, voire l'Essai), connaît donc l'acquéreur de données, et est à même de rendre hommage à celui-ci, ou à ne pas tenir compte de données dont cette signature authentifie le caractère suspect.

L'utilisation d'une Base de Données Relationnelle évoluée, comme ECORDRE, permet donc de régler les rapports sociaux associés à la qualité et à l'usage des données.

9. Utilisation de la base

Fondamentalement ECORDRE est fait pour fournir, à partir des données qui y sont stockées, celles relatives à une question qui peut être très complexe et précise. On effectue alors une requête dans un langage spécifique aujourd'hui normalisé (SQL) qui met en jeu des relations entre tableaux.

Dans l'exemple de la fig. 5-5 (p. 331) on désire connaître le Lieu de la région où des études de peuplements de lombriciens ont été effectuées avec la technique de collecte formol-bêche en prairie. Sur cet exemple simple, seulement trois relations sont mises à contribution et la requête s'écrit :

```
SELECT B.Lieu, B.Placette, Département, Commune, Gestion, Complément,
Technique
FROM LIEU A, PLACGESTION B, PLOTLOMBR1C C
WHERE B.Lieu = A.Lieu AND B.Lieu = C.Lieu AND B.Placette = C.Placette AND
Département IN(11,30,34,48,66) AND Gestion ='PRAIRIE' AND
Technique — 'FOBE'
```

La réponse s'obtient très rapidement à l'écran sous forme d'un tableau donnant les indications en clair des lieux, placettes, départements, communes, mode de gestion (ex : prairie), complément sur ce mode (ex : permanente) et technique de capture.

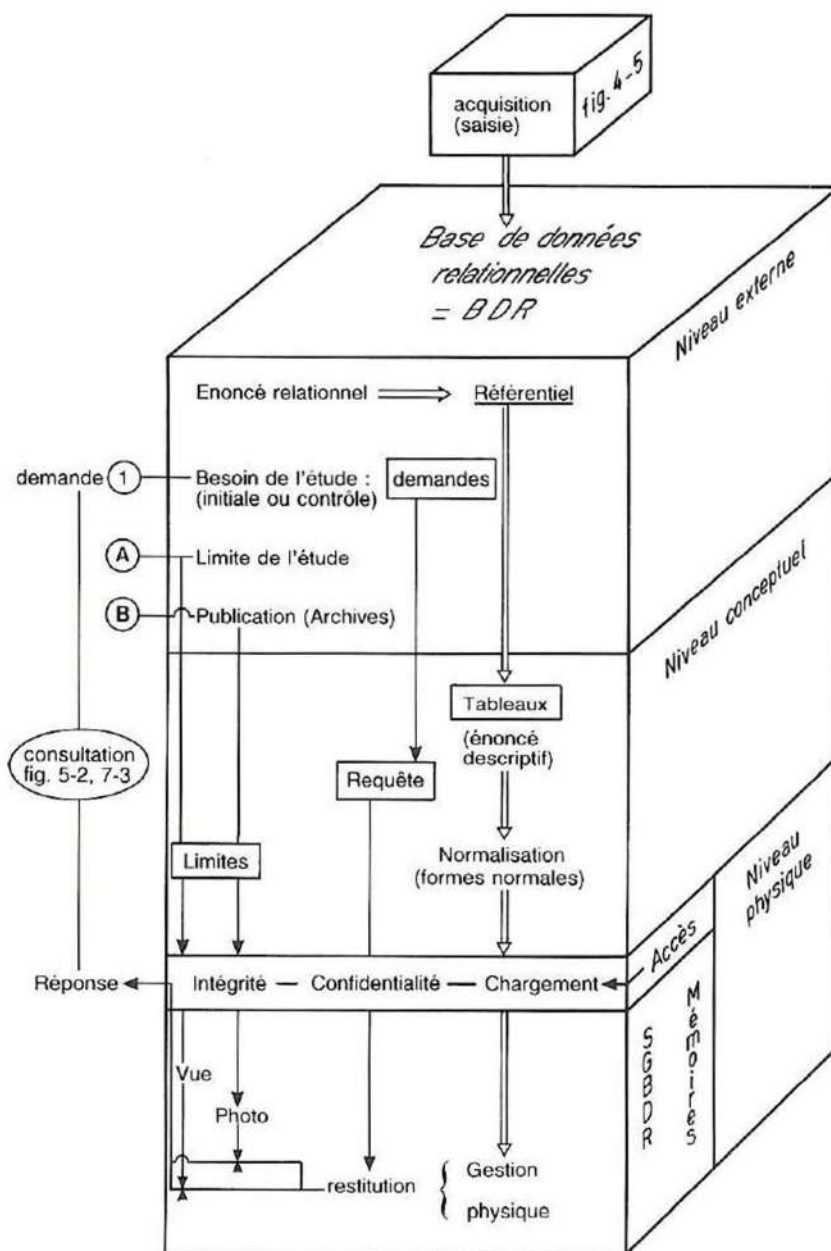


Figure 5-4 - Fonctions d'usage d'une BDR.

Celle question aurait pu être beaucoup plus précise, par exemple compléter par : je désire connaître le stade des 5 individus de poids maximal de *Lumbncus lerrestris* pour chaque lieu où cette espèce a été observée.

Les requêtes sont exprimées dans un langage informatique non algorithmique, simple, presque naturel, et facile à acquérir par un non-informaticien. La SGBD(R) a pour charge d'explorer dans la base, qui peut être très riche, le chemin d'accès aux données et assure la réponse.

Or il n'est pas rare que de mêmes données demandent une ré-évaluation à partir de problématiques nouvelles. Ainsi des données ont été acquises dans une étude agro-environnementale au Marais Poitevin dans un contexte d'intensification agricole (travaux d'assèchement hydrauliques) et ont porté sur l'état des changements des agro-écosystèmes (BOUCHE *et al.*, 1988a). Ces mêmes données sont ré-utilisables pour partie dans un objectif d'appréciation de la richesse des milieux dans un contexte "inverse", celui de la déprise agricole. La lenteur initiale des collectes de données sur les systèmes écologiques est suppléée par la vitesse des réponses aux requêtes en BDR.

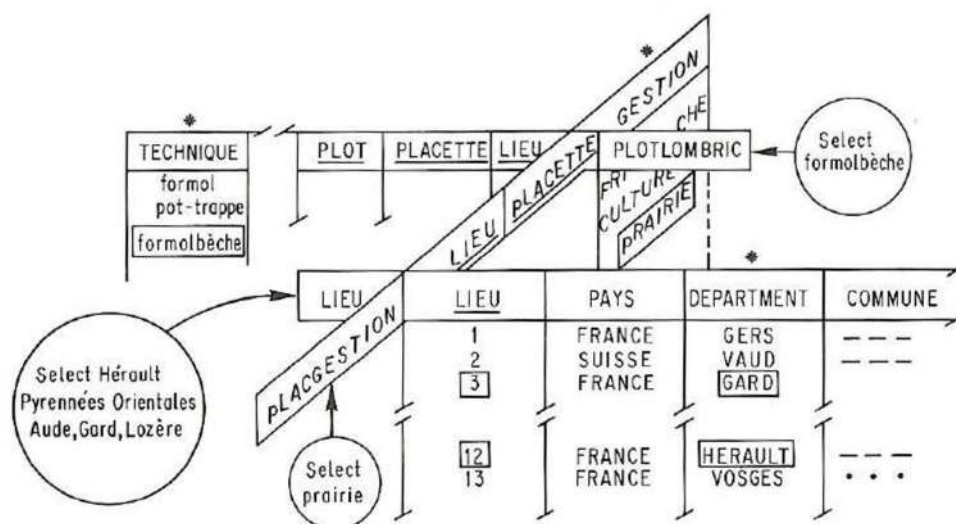


Figure 5-5 - Connexions inter-tableaux et modalités de sélection des données adéquates suivant une requête (schéma simplifié théorique). Le SGBDR recherche les tableaux adéquats par un chemin qu'il optimise pour extraire l'information souhaitée* (ici les lieux de la région Languedoc-Roussillon étudiés par la technique "formol bêche" dans une prairie).

Après cet accès automatique aux données, il est possible d'inclure les ordres SQL dans des programmes d'application, par exemple en PL/1 ou FORTRAN, autrement dit à partir de DICS de calculer des DSEs standards et également d'enchaîner les opérations avec des logiciels de traitements statistiques, graphiques, etc...

N° d'ordre de l'article	ECORDRE		MOTIVATIONS INITIALES	MILIEUX	N lombric. kg/ha
	Lieu	Placette			
1	433	A	Comparaison de techniques de capture de lombriciens	Prairie permanente	26,5
2	127	A	Programme Biologique International (Normandie)	Idem	35,0
3	433	B	Témoin d'essais d'herbicide	Idem	28,0
4	RIGO	A	Comparaison de prairies en Lorraine	Idem	11,9
5	*	R	Idem	Idem	13,7
...	...	...	...	...	...
9	*	M	Idem	Idem	13,5
10	2388	A	Comparaison de gestion cultures/herbage	Blé	0,04
...	...	...	...	...	...
20	1735	A	Comparaison de gestion de prairies suisses	Prairie permanente	25,5
21	1734	A	entre méthodes conventionnelle et biodynamique	Prairie biodynamique	11,1
...	...	...	...	...	...
26	2432	A	Comparaison faune méditerranéenne	Verger enherbé	20,6
27	*	A	Comparaison de méthodes de travail du sol (labour/	Labour	3,1
28	*	B	déchaumage/semis direct)	Déchaumage	4,7
29	*	C	Idem	Semis direct	8,3
30	2396	A	Comparaison de parcelles en fermes de référence	Prairie artificielle	14,5
31	2397	A	dans le Marais Poitevin	Mais	11,9
32	2398	A	Idem	Prairie artificielle	4,6
...	...	...	...	...	...
55	1995	A	Comparaison semis direct, rotovator, cultures	Blé, tournesol, maïs	5,1
56	1995	B	en exploitation d'élevage	Prairie artificielle	39,4
...	...	...	...	...	...
60	1995	F	Idem	Semis direct	37,8
61	1995	G	Idem	Prairie permanente	29,0
62	1995	H	Idem	Hersage, maïs, sevin	30,4
63	1995	I	Idem	Semis direct, maïs	44,2
64	1995	J	Idem	Labour, sevin, maïs	23,3
65	1995	K	Idem	Prairie, semis direct	48,2
66	1995	L	Idem	Prairie permanente	57,8

Tableau 5-1 - Motivations d'acquisition et ré-utilisation ; l'exemple de peuplements de lombriciens (tableau partiel).

La BDR peut enfin être mise à jour par adjonction ou suppression de données sans qu'il soit nécessaire de modifier le programme d'application.

ECORDRE, pouvant aborder la complexité du champ écologique d'une part et le langage SQL seul ou intégré dans des programmes d'applications d'autre part, permettent de valoriser toute l'information disponible, y compris celle que l'on ignore initialement (données enregistrées il y a longtemps, et oubliées, ou données apportées par un important groupe de chercheurs où chacun n'est pas au courant des acquis de l'autre).

Pour illustrer l'utilisation d'ECORDRE nous allons présenter celle-ci sur un cas concret.

A la suite de l'inquiétante évolution de l'accumulation de nitrate dans les eaux souterraines (entraînant des accidents parfois graves : méthémoglobine : ANONYME, 1986) le Ministère de l'Environnement a cherché à promouvoir les recherches sur le cycle de l'azote notamment pour une utilisation plus rationnelle des engrais et une meilleure maîtrise des contaminants azotés.

L'une des questions a donc été : quels sont les compartiments "stockant" cet azote ?

En tant que spécialiste de lombriciens, j'ai été sollicité pour estimer le niveau de stockage de ces animaux. Pour cela, nous avons "mobilisé" notre état des connaissances sur les peuplements de lombriciens gérées par ECORDRE. Ceci permettait de connaître le niveau des peuplements, la technique d'estimation de ce niveau, parfois très biaisante, les diverses espèces stockant l'azote, leur mode de vie (donc de fonctionnement), enfin de regrouper en catégorie écologique ces informations grâce à la macroprocédure de "proration" (p. 365). Cette proration porte sur l'attribution des divers lombriciens (et tronçons de lombriciens coupés lors des collectes) à des catégories écologiques à partir des individus identifiés et d'une échelle morphofonctionnelle attribuant chaque taxon à sa catégorie écologique (p. 245).

Le tableau 5-1 résume l'origine des données et la motivation initiale de l'acquisition de ces données, toujours indépendante de cette ré-interprétation. Ce tableau donne les valeurs obtenues pour ce nouvel objectif.

Celles-ci permirent, de calculer le stock azoté (heureusement proportionnel à la biomasse) et même, ce qui n'était pas demandé, de calculer la cinétique probable de cet azote au champ (p. 419).

Par contre, il fut impossible d'extrapoler ces données à la surface, par exemple de la France, les données quantitatives étant insuffisantes pour permettre l'extrapolation-interpolation : une Base de Données Relationnelle permet l'accès aux données mais ne peut suppléer à leur carence.

5.5. Les bases de données et l'élaboration des connaissances

Investir dans le développement du schéma conceptuel d'une Base écologique comme ECORDRE est un gros travail. Assurer l'administration de cette Base et notamment son chargement implique aussi un investissement initial (description et énoncé des relations, normalisation des tableaux). Ce coût initial doit être comparé aux avantages immédiats et futurs d'une BDR écologique :

1) Introduction, entre le schéma classique acquisition des données — interprétation, d'une étape de gestion des données sur le mode relationnel explicitant ces relations.

2) Standardisation du langage conceptuel qui, par rétroaction positive, agit sur la formalisation des recherches.

3) Description simplifiée et normalisée de toutes les données sur les systèmes écologiques, dans une pratique proche du raisonnement humain.

4) Le SGBDR agissant par déduction à partir des requêtes assure les chemins d'accès aux données existantes, indépendamment de leur motivation d'étude.

5) Il y a indépendance de la gestion en BDR et des hypothèses de recherches. On peut introduire des données erronées ... ou interpréter de façon erronée des données correctes. La gestion est indépendante des hypothèses faites en options d'acquisition ou en propositions de synthèse. Seulement le mode relationnel de gestion peut révéler, par sa formalisation, des carences procédurales d'acquisition.

6) Il y a indépendance des informations par rapport aux structures physiques de stockage : les liens informatiques, ou pointeurs, ne sont pas fixés définitivement mais sont créés dynamiquement selon les besoins.

7) Il y a indépendance entre données et programmes de recherches, suppression des approches séquentielles et affranchissement des structurations micro-disciplinaires : moyennant un minimum de langage opérationnel (voir Lexique) les disciplines agissant sur le champ écologique peuvent (et en conséquence doivent) mettre leurs données objectives en commun.

8) A la différence des gestionnaires de fichiers (e.g. DBASE 3) les BDR ont un SGBD destiné à permettre l'accès à l'information de façon conviviale et télématique.

9) La mise en commun fluide des données sur l'écosphère quelles que soient leur origine et leur nature, est donc réalisable graduellement par des BDR reliées par télématique en "espace partagé".

10) Les BDR contribuent à l'intelligence Artificielle. Elles ont un langage non algorithmique et prennent en charge une connaissance qui peut être interfacée via des Systèmes Experts à des Bases de Connaissances. Il s'agit d'une étape dans l'intelligence explicite des systèmes écologiques (= complexes) importante par la mise en commun transdisciplinaire des "intelligences".

Il y a encore très peu de temps la gestion des données et des connaissances n'était pas une préoccupation explicite. L'important étant d'acquérir des données et de les interpréter. Avec les possibilités de gérer des masses considérables d'informations, la gestion des données est devenue une activité en soi, tel le GRID (Global Resource Information Database), Base de données relatives aux ressources mondiales du GEMS (Global Environment Monitoring System) du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). Cette gestion est même parfois plus importante que l'acquisition ou l'interprétation car les interprétations automatiques peuvent être rapides (chap. VI) et les données peuvent pré-exister dans des BDR, voire des fichiers. Dans les grands programmes, cette gestion des données est devenue une problématique en soi (cf. par exemple MiCHENEK, 1986) ; elle devient l'une des bases de l'écologie (de l'écosphère). La gestion des connaissances est quelque peu différente puisque celles-ci comprennent des faits et des règles décidées temporairement par les experts pour utiliser ces faits. Après une interprétation synthétique des données (chap. VI), elles doivent être en définitive intégrées pour être confrontées aux systèmes écologiques réels (chap. VII).

CHAPITRE SIXIEME

INTERPRETATION SYNTHETIQUE

6.1. Introduction à l'interprétation

6.1.1. Modalités d'interprétation

Nous avons jusqu'à présent pris en considération l'écologie générale dans ses fondements (chap. I) ayant trait aux systèmes écologiques (chap. 11) ou plus restrictivement au domaine biologique (chap. III).

Mais son élaboration requiert simultanément une acquisition explicite de données adéquates et suffisantes (chap. IV) pour devenir interprétables. Celles-ci doivent être gérées de façon exhaustive et intégrée, ce qui n'est possible qu'avec une informatique moderne, éliminant les pertes d'information et optimisant l'accès et la circulation des données (chap. V).

Intégrer l'information, préalablement disséquée et brisée par la démarche analytique, implique d'effectuer une synthèse intellectuelle, c'est-à-dire une expression de l'information en termes moins détaillés résumant l'information au détriment des "détails".

Idéalement cette interprétation synthétique vise à reconstruire en termes plus condensés la totalité de l'information contenue dans les données et, malgré le caractère restreint de la globalyse, à généraliser les propriétés dégagées à l'ensemble du domaine écologique échantillonné. Elle vise ultérieurement à permettre la confrontation, par validation aux faits, des prédicats effectués sur le niveau d'observation supérieur (p. 35, 94).

En pratique, la synthèse peut aussi s'exprimer par un commentaire sur des faits.

Ceci revient à dire qu'une synthèse peut être appuyée par une conclusion vérifiée par de multiples faits, voire à l'inverse, par un commentaire interprétatif intellectuellement plaisant fondé par peu (ou pas) de fait(s). Il y a une grande diversité dans la fiabilité des interprétations en raison de la limitation des moyens de recherche ; un certain laxisme intellectuel, hypothético-déductif, sans véritable contrôle, prévaut encore souvent aujourd'hui.

Mais l'écologie, science globale, ne peut qu'être fondée sur des faits et interprétations réfutables.

Même au niveau de la synthèse écologique où les hypothèses sont nécessaires et indispensables, il n'est pas possible opérationnellement de s'écarter au-delà de ce qui est réfutable par des données objectives (DICs) (p. 24 : écologie et réfutabilité).

Cette exigence est d'autant plus impérieuse que l'écologie étant complexe se prête aux spéculations hypothétiques, par exemple, d'histoire naturelle. Mais étant proximale des actions humaines, dont les conséquences doivent être sérieusement connues, elle doit être impérativement assujettie à la rigueur scientifique. Même si

cette rigueur est irritante, exigeante et limite désagréablement les "théories écologiques" en réduisant leurs spéculations au domaine réfutable (p. 90).

A condition d'abandonner les pratiques traditionnelles de gestion des connaissances (p. 300) les moyens actuels d'acquisition d'information, de gestion des données (p. 312) et d'interprétation systémique (p. 421) nous permettent aujourd'hui une véritable élaboration rigoureuse de l'écologie.

Mais, comme pour toute science exacte, marquée par une tradition d'études approximatives, nous ne sommes pas accoutumés à une telle pratique. D'autre part, la complexité des démarches analytico-synthétiques dans le vaste domaine du champ écologique sont propres à nous "perdre" dans un dédale intellectuel incontrôlable : l'écologie ne pourra progresser que si, et seulement si, une référence rigoureuse aux faits (y compris à leur fiabilité) accompagne une interprétation critiquable au plan scientifique.

Toute interprétation a pour résultat une synthèse ; réciproquement faire une synthèse c'est interpréter, par essence, temporairement.

Les connaissances scientifiques ont deux origines, les faits et leurs interprétations (de mêmes faits pouvant aboutir à plusieurs interprétations ; des faits différents conduisant éventuellement à la même interprétation).

Les faits sont notre perception de la nature telle quelle, c'est-à-dire directement observée à travers des moyens d'analyse et traduite par des DICs acquises et ordonnées par leurs liens (chap. IV, V). En outre, certains faits sont considérés comme des connaissances générales, supposées acquises, ou "évidentes", et exprimées dans des bases de faits de BdC (p. 428).

Les interprétations constituent des constructions intellectuelles résumant cette information des faits pour en tirer un résultat général, mais avec l'espoir, vérifiable *a posteriori*, de retrouver des données conformes aux premières généralisations. En tout état de cause, les interprétations doivent produire des résultats prédictifs donc réfutables par contrôles dans le champ écologique.

En ce sens, les DICs et leurs liens au réel sont, aux erreurs de mesures près, objectives (liées aux objets) alors que les interprétations, démarches synthétiques sur l'information, sont des tentatives pour résumer ces données et des inférences vérifiables par de futures données.

Toute interprétation scientifique est, par essence, nécessairement temporaire, hypothétique et susceptible d'une ré-interprétation plus performante. L'écologue devra, entre autres qualités, apprécier la relative fiabilité des interprétations. Certaines ont été vérifiées des millions de fois, tel le fait que l'attraction terrestre fasse retomber sur le sol tout objet lancé (ou lâché) en l'air (comme les milliards de feuilles se détachant des arbres). A l'opposé, beaucoup d'interprétations du champ écologique, ne serait-ce qu'en raison de l'absence de moyens de répétition des études, n'ont jamais été contrôlées. Ceci ne montre pas leur fausseté mais simplement les rendent moins assurées que celles qui ont été contrôlées.

On constate ainsi que l'hypothèse (interprétation supposée soumise à contrôle) ne diffère de l'expression de résultats acquis que par le degré d'incertitude. L'hypothèse par définition est antérieure à la conclusion de l'étude dont les résultats seront soumis à leur tour à de nouveaux contrôles. Ces approximations successives de plus en plus fiables s'appliquent à un domaine vaste, divers et complexe. Elles sont présentement contrôlées de façon hétérogène et obligent à une clarification des hypothèses et pratiques (p. 344).

Au cours des interprétations des DICs, l'écologue, utilisant des données relatives à des sciences exactes (physique, biologie et chimie) est conduit, comme les chercheurs de ces disciplines, à un usage important de la mathématique. Comme déjà

indiqué en avertissement de ce livre, son objet n'est en aucun cas de se substituer aux excellents ouvrages, notamment de biométrie, qui présentent les divers outils mathématiques utilisables par les écologues. Le présent chapitre vise seulement, après l'acquisition des données (chap. IV) et la gestion moderne des connaissances (chap. V), à présenter la mise en œuvre de ces outils d'interprétation, notamment après la mise en forme des ensembles de données en matrices qui vont servir aux traitements mathématiques. D'une façon plus générale, il s'agit de situer 1) les divers moyens permettant à l'écologue de partir de la réalité (le global) vers des focalisations (le particulier) et non l'inverse, 2) d'évoquer "de l'extérieur" les outils lui permettant une typologie, une classification, une aide à la décision ou une synthèse des connaissances sur le fonctionnement des systèmes écologiques. Ces outils, ainsi évoqués, font l'objet de nombreux travaux spécialisés, d'ailleurs en rapide évolution, auxquels le lecteur doit se reporter.

Avant d'aborder plus en détail les interprétations opérationnelles, il y a lieu - car le sujet étant délicat se prête à des glissements conceptuels favorisés par une sémantique floue - de préciser la place de l'interprétation dans l'ensemble de la démarche écologique. Je le ferai très concrètement en calquant celle-ci sur la présentation orthodoxe d'un article scientifique, ou d'une thèse, laissant à plus tard les conséquences opérationnelles de l'intelligence Artificielle (chap. VII) déjà partiellement discutées aux paragraphes 1.7.6., 1.7.7. et 4.1.

Toute recherche se justifie par l'énoncé explicite d'une problématique complétée d'objectifs concrets. Elle est décrite dans l'"introduction" des articles scientifiques. Puis les options précisent les objets écologiques étudiés et les techniques d'étude utilisées ; c'est la partie "matériel et méthodes" des articles, précédant un exposé des "résultats". Ces "résultats" devraient comporter les DICs (quoiqu'aujourd'hui cette nécessité scientifique soit matériellement occultée (p. 304) mais pourra être satisfaite (p. 312)). Ces DICs et leurs liens au réel font l'objet de l'interprétation qui, au moyen d'hypothèses spécifiques, les propositions, tend à résumer cette information du point de vue particulier de fauteur et des objectifs qu'il s'est assigné. Enfin la conclusion remplace les "résultats" dans leur contexte scientifique.

La problématique et la conclusion ont trait à l'intelligence (= aptitude à comprendre) de la recherche. Opérationnellement elles sont liées entre elles car les problématiques résultent de conclusions antérieures dont elles ne sont souvent que la reformulation. Les problématiques et conclusions sont des commentaires (p. 26) qui peuvent être pris en compte par Intelligence Artificielle et donc intégrés avec les éléments d'interprétation dans des Bases de Connaissances.

6.1.2. Objectifs d'interprétation

Toutes les acquisitions de données visent essentiellement à décrire un ou n caractéristiques de un ou n systèmes (p. 91). Fondamentalement, nous savons que ces données décrivent des composants d'un système plus vaste que nous n'appréhendons qu'à travers les options plus ou moins habiles, sur les caractéristiques et que par un nombre nécessairement limité de données rapportées à chaque caractéristique.

D'une façon générale nous pouvons poser plusieurs objectifs, par exemple :

- a) Tendre à reconstituer à partir des caractéristiques observées l'ensemble d'un système écologique ; c'est-à-dire tendre, par des propositions inférencielles, à "gommer" les conséquences des options.
- b) Comparer des systèmes écologiques entre eux et par opposition reconnaître des différences entre systèmes.
- c) Classer ces systèmes les uns par rapport aux autres soit à partir de leurs traits, soit à partir d'un choix orienté *a priori*.
- d) Apprécier l'amplitude des différences entre ces systèmes (établir des "distances" ou des probabilités de différences).
- e) Essayer de mesurer ces différences par rapport à un standard (= témoin) constant.

I) Considérer si les différences observées, notamment en d et e, ne découlent pas du hasard de l'observation (artefact aléatoire).

g) Expliquer les mécanismes conduisant aux différences d'état observées : c'est-à-dire expliquer le fonctionnement de ces systèmes ; c'est tendre à les représenter par des modèles mimant les systèmes réels.

h) Cette liste n'est pas limitative.

Ces différentes opérations se font sur les bases objectives de DICs regroupées en ensembles à interpréter (c'est-à-dire d'une portion de globalyse, ou connaissance partielle du champ écologique).

Les interprétations, aboutissant à des synthèses, résument une information de niveau inférieur dans le champ écologique vers le niveau "supérieur". Dans la hiérarchie des niveaux d'observation, ceci revient à résumer des informations d'un niveau n en une forme plus synthétique (n + 1).

Les informations acquises directement au niveau n + 1 sont alors confrontables à la synthèse n + 1 effectuée à partir des données issues de n. Il s'agit d'une validation des hypothèses introduites dans l'interprétation d'un niveau n vers n + 1, et aboutissant à la synthèse n + 1, à comparer au niveau de globalyse n + 1 (p. 35, 94).

Par exemple, (fig. 6-2, p. 347), l'étude des changements d'état de 36 lombriciens *Nicodrilus longus* adultes, en fonction du temps, a fourni 36 DICs relatives au ¹⁵N corporel de chaque individu. Ces DICs ont été converties en pour mille du marquage initial, puis une hypothèse pour la synthèse (= proposition) a été acceptée : la moyenne des quatre DICs de chaque date était représentative de l'état *N. longus* adulte à cette date, la dispersion des DICs autour de cette DSE étant très faible. Ensuite, une fonction d'ajustement mathématique a condensé l'information des 8 moyennes (DSEs) en quatre paramètres. Une nouvelle proposition accepte alors l'ajustement comme correct. Cette décision permet de généraliser l'information objectivement observée à 8 dates à tout instant d'une portion de 40 jours par interpolation. Ainsi, l'observation, de niveau individuel, est extrapolée à l'écophase (= adulte) d'une espèce par une première proposition, puis les changements d'état observés à 8 dates discontinues sont synthétisés par une seconde proposition permettant une interpolation en continu au niveau d'une période de 40 jours. Ces propositions sont des inférences (p. 345). La fonction mathématique permet ensuite à partir de ce changement d'état le calcul d'une cinèse.

Nous savons que chaque donnée

- 1) décrit un composant systémique,
- 2) est le reflet soit d'un état soit d'une cinèse,
- 3) résulte de cinèses, si elle est un état,
- 4) modifie les états, si elle est une cinèse.

Sous réserve que les données soient suffisantes, il est possible de comparer l'identité des objets-systèmes étudiés. L'identité étant relative : un objet est relativement semblable à un objet-référence.

La comparaison des objets écologiques (p. 93, 357) sera donc une préoccupation qui peut conduire à un classement par différence relative de ceux-ci qu'ils fussent biologiques, abiotiques ou biophysicochimiques. On peut aboutir ainsi à une typologie (les objets étant plus ou moins identiques à une référence typique : identification à un type) et effectuer des classifications, c'est-à-dire des regroupements en classes d'entités plus semblables entre elles qu'elles ne le sont des autres.

La comparaison n'implique pas des relations fonctionnelles relativement semblables pour des proximités élevées. Elle n'explique que les similitudes, et ne porte pas sur les relations entre états et cinèses dans les trois référentiels du champ écologique.

La description des systèmes se fera méthodiquement et exhaustivement par la modélisation qui recense systématiquement les composants essentiels (p. 91). Il s'agit d'une exploration d'un système (aussi réduit qu'il soit) pour en expliquer les propriétés perçues.

La systémique est l'étude explicative, si possible exhaustive, des systèmes. La typologie est la comparaison des objets (p. 93).

En systémique, l'étude de l'organisation des propriétés d'état et de cinétique perçues d'un objet, vu comme un système (p. 93), se fera par la modélisation qui ne s'effectue et se contrôle que vis-à-vis de ce système. La modélisation peut se faire au niveau de descriptions simples (modèles conceptuels) pouvant être mimés physiquement (modèles physiques ou microcosmes), ou pouvant être synthétisés mathématiquement à partir des informations objectives sur l'objet (DICs), modèles mathématiques dont infosystèmes et ISTECS (p. 98, 357).

Tous les traitements synthétiques (comparaison et modélisation) conduisent à des appréciations relatives sur la similitude entre deux objets-systèmes, ou bien sur l'adéquation relativement bonne ou mauvaise, d'un modèle au système réel. Ces appréciations sont évidemment dépendantes de l'information disponible (données de la globalyse). A toutes étapes de la synthèse, on peut être amené à comparer la qualité de l'identité de deux séries d'objets ou à valider un modèle au système mimé. Cette appréciation vise à savoir si, en définitive, ces similitudes et adéquations sont satisfaisantes, incertaines, ou franchement lâches (éloignement ou inadéquation). Il s'agit alors de faire des estimations décisionnelles sur l'identité relative des classes us objets concrets ou modèles us systèmes.

Ces trois démarches s'appuient sur trois familles interdépendantes, mais opérationnellement distinctes, de traitements mathématiques appliqués aux données écologiques :

- 1) la comparaison des objets s'appuie sur les statistiques descriptives,
- 2) l'explication des systèmes correspond à leur modélisation qui s'exprime mathématiquement par des infosystèmes, validés sur les systèmes écologiques,
- 3) l'aide à la décision correspond aux statistiques probabilistes.

Les statistiques descriptives tendent à refléter directement l'objet (le système) perçu tandis que l'infosystémique et les statistiques stochastiques établissent par inférence des entités nouvelles à partir d'autres ; ces deux dernières pratiques **appartiennent aux statistiques inférentielles (fig. 6-1).**

Comparaison, explication et décision sont des processus qui ne se traduisent que sous deux formes, des typologies et des infosystèmes morphofonctionnels, que, par décision, on considère comme momentanément les plus corrects possibles.

Les synthèses des études comparatives privilégient l'information écologique, objectivement acquise par DICs, pour extraire aussi totalement que possible une identité relative (proximité), une reconnaissance, voire une classification ("ordination") dégageant une typologie des entités écologiques. Le rôle fonctionnel des entités n'est pas étudié en soi, par contre leurs différences, similitudes, contrastes ou continuums aboutissent à des typologies qui sont la synthèse de données plus élémentaires. Cette synthèse répond aux objectifs a) à d), et dans une certaine mesure e) décrits ci-dessus. Ce type de synthèse sera d'autant plus performant qu'il résume le plus d'informations avec un minimum d'hypothèses.

La systémique privilégie par contre les systèmes écologiques à la fois dans leurs états et leurs cinèses, les états étant conséquences et régulation des cinèses. Ces synthèses impliquent l'aptitude, encore rare et très limitée, de mesurer des cinèses écologiques de sorte que les systèmes en cause sont généralement comparativement pauvres en variables cinétiques. Ces synthèses systémiques portent essentiellement sur l'objectif g) (et éventuellement e) décrit ci-dessus.

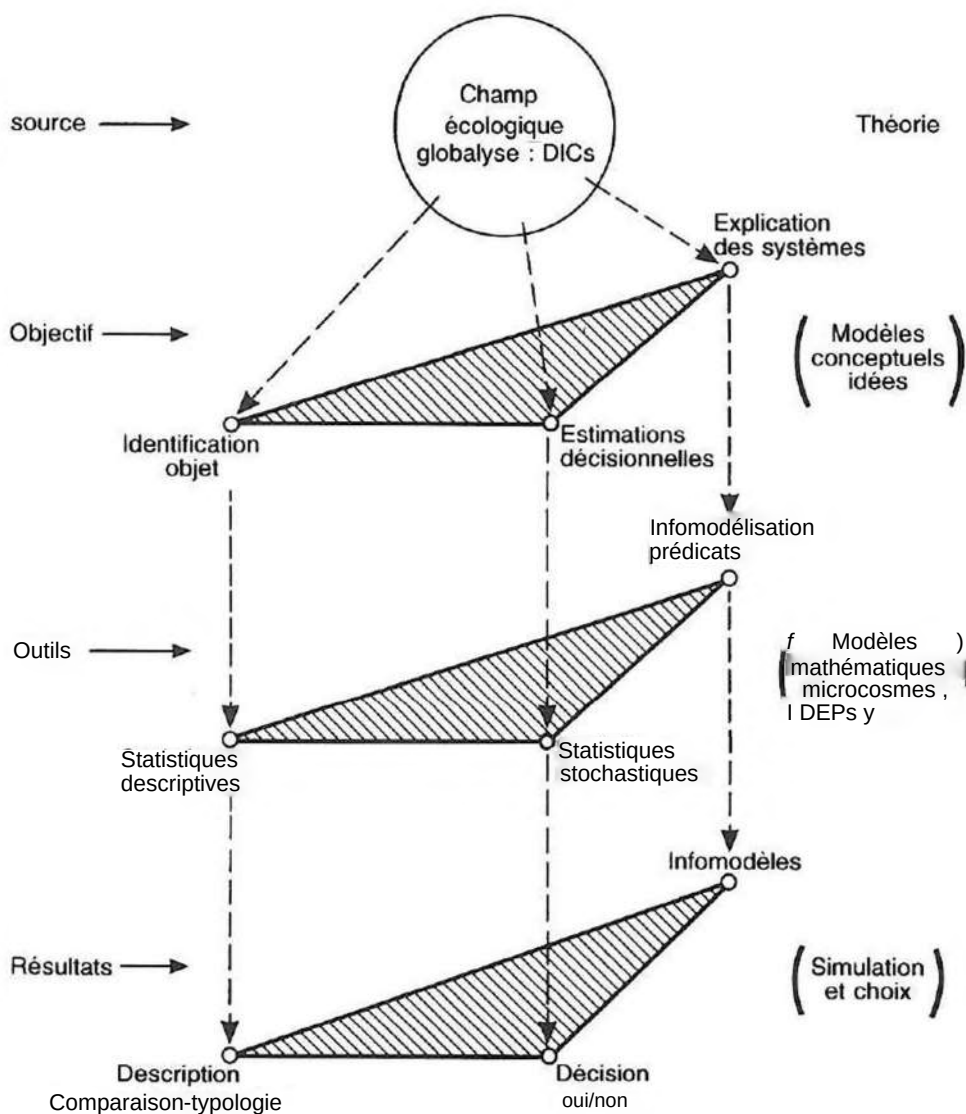


Figure 6-1 - Interprétations des données écologiques en fonction de trois objectifs, de trois outils logiques (mathématiques) et trois résultats. Le contexte théorique des idées et des recherches exploratoires en conditions non écologiques influence l'organisation des données.

En résumé, l'interprétation est une relation singulière expert-«—»-données.

1) Elle résulte objectivement des options de l'expert ayant réduit le champ écologique à la globalyse.

2) Elle porte ensuite sur les données de cette globalyse d'abord en comparant les ensembles de celle-ci. Ces comparaisons typologiques se font par les statistiques descriptives et permettent de constater de proximités apparentes entre ensembles de données caractérisant des objets-systèmes.

3) Elle porte aussi sur la description explicative des systèmes morphofonctionnels, effectuée systématiquement par système, à partir de la partie perçue de ceux-ci et reconstruits en infosystèmes mathématiques validables avec les systèmes écologiques.

4) Dans ces opérations l'expert cherche à choisir dans les continuums les discontinuités, à connaître la validité des différences observées, à apprécier le poids des aléas : des tests d'aide à la décision facilitent et confortent les choix hypothétiques effectués en 2) et 3).

6.1.3. Moyens d'interprétation

L'écologie *stricto sensu* a été peu mise en oeuvre, par carence de moyens adéquats (p. 20, 103, 105). Toutefois, très tôt les démarches conceptuelles ont correctement exprimé les concepts d'hypervolumes du champ écologique, tel le milieu de BERTILLON (1860), "Tökologischen Einheitsfactor" de l'holocénose de FIUEDRICH (1927), telle la "niche fondamentale" de HUTCHINSON (1957) et l'approche systémique implicite dans HAECKEL (1866, p. 20) et explicite chez TANSLEY (1935, p. 107). Mais dans cette période pré-informatique rien n'était opérationnellement possible.

Nous vivons présentement le bouleversement informatique qui apporte la possibilité d'étudier le complexe, d'analyser le global, c'est-à-dire de pratiquer l'écologie.

Ceci nous oblige en écologie 1) à restaurer le sens non détourné de la discipline, 2) à disposer d'un minimum de connaissances sur les systèmes biophysicochimiques (chapitre I) et sur leur structure et fonctionnement (chapitre II) et 3) à assurer l'acquisition de données objectives sur les systèmes écologiques (chapitre IV) avec un langage univoque, dépassant les jargons spécifiques des diverses disciplines concourant à l'étude des systèmes écologiques sous contraintes socio-économiques.

Ceci nous oblige aussi à ré-évaluer nos pratiques à la fois en tant que chercheur nécessairement spécialisé - pour avoir un domaine de compétence - et à la fois en tant que contributeur à une connaissance de systèmes trop complexes pour une étude solitaire. L'écologue ne peut être seul et se doit d'avoir un langage écologique univoque. Il se doit aussi - ne serait-ce que pour respecter l'éthique scientifique de contrôle (p. 314) de mettre à disposition de la communauté humaine les données et connaissances acquises.

Cette mise à disposition (obligeant à nouveau au langage commun) peut se faire aujourd'hui de façon explicite et rationnelle grâce au référentiel des données (p. 296) et aux Bases de Données Relationnelles (p. 319).

C'est que nous vivons un bouleversement informatique à double détente, où il faut distinguer trois époques :

1) l'époque pré-informatique, où le caractère fastidieux des calculs et des manipulations de données limitait la gestion et le traitement des données ;

2) l'époque d'informatique classique, pratiquement développée dans les années 50 à 70 où l'accumulation de masses de données devenait possible dans des fichiers sur supports mécanographiques (cartes et bandes perforées) puis magnétiques et où les traitements mathématiques, imaginés dans la période pré-informatique, sont appliqués grâce à des logiciels permettant le traitement séquentiel par dossiers, objectif par objectif, consultation statistique par consultation statistique ;

3) l'époque d'informatique moderne des années 80 qui bouleverse encore ce schéma. Les données peuvent circuler entre tableaux de BDR. Quelles que soient leurs motivations d'acquisition initiales, elles sont organisées pour pouvoir circuler. Les concepts du chercheur, même approximatifs ou flous, peuvent être pris en compte par heuristiques dans une Intelligence Artificielle où le chercheur entre en contact direct non seulement avec ses données, mais avec celles de la communauté scientifique, dans le cadre de ses problématiques mais aussi dans celles de toute sa discipline, voire d'autres disciplines. L'écologie science globale devient possible!

Mais le spécialiste, quelle que soit sa compétence, reste réduit à ce qu'il est : un spécialiste. A moins d'ignorer les changements induits par la 3ème époque par un isolement sémantique vain et un dogmatisme temporaire, il n'est plus possible d'éviter le nouveau positionnement du statut personnel de l'écologue (p. 103, 464).

Ceci n'est pas propre à l'écologie. Tout spécialiste (agronome, environicien, aménageur, forestier, ...) travaillant sur des systèmes "naturels" nécessairement complexes est aussi réduit, par ses aptitudes limitées, au domaine qu'il couvre effectivement.

C'est ici que la notion d'EXPERT prend toute son importance par sa signification générique : qu'il soit écologue, pédologue, forestier, zoologiste, botaniste, chimiste, climatologue, ... le spécialiste en tant qu'expert concourt à l'oeuvre commune de compréhension des systèmes spontanés complexes et à l'appréciation de l'impact de nos actes sur ceux-ci.

Pour l'interprétation, aussi correcte et réfutable que possible, un type d'experts est omniprésent : le statisticien, il est l'inévitable compagnon des autres experts lors de la phase d'interprétation et de systémique prédictive (chap. VII). Mais le statisticien est lui-même directement engagé dans le bouleversement informatique à double détente évoqué plus haut. Il y a un renouvellement profond des méthodes statistiques sur la base d'un usage intensif de l'ordinateur (ESCOUFIEK, 1987) qui est en cours. A cet égard, notons que l'interprétation est un dialogue expert-«— données, au cours duquel différentes techniques de traitement permettent à l'expert

- a) une exploration des données en vue d'en fournir un résumé synthétique,
- b) une généralisation -ou inférence- des résultats hors du domaine effectivement observé, avec des risques que l'expert s'efforce d'apprécier par des tests.

La généralisation de résultats se fait en écologie selon divers moyens : simple opinion verbale ou écrite, opinion d'expert soumise à une sorte de réfutation par congruence avec les autres opinions dans une Base de Connaissances ou usage d'opérateurs logiques (mathématiques) pour effectuer ces généralisations à partir de DICs (ou de DSEs issues de DICs).

La généralisation rend général : terme générique, elle ne précise pas plus. En philosophie, en logique et en mathématique, trois termes ayant trait aux généralisations sont utilisés avec des sens parfois quasi synonymes, parfois plus précis ; nous retiendrons ici ces derniers sens. L'inférence est un acte logique par lequel on attribue à un corps (ou système), en conséquence de quelques-unes de ses propriétés, les autres propriétés connues de ce corps. Ce terme logique s'applique aux statistiques inférentielles et aux logiciels reliant les faits entre eux grâce à des règles mises en oeuvre par un "moteur d'inférence". On peut y distinguer deux démarches intellectuelles : l'induction qui généralise à partir de faits par la recherche des causes ayant entraîné ces faits, et la déduction qui à partir des faits-causes en lire les conséquences pour décrire des faits-effets.

En observant l'ensemble de la procédure de recherche écologique (chap. VII) l'expert intervient en permanence dans les options, puis par des propositions qu'il soumet à des tests divers avant de les rendre accessibles pour une réfutation dans un nouveau travail complémentaire partant de nouvelles données accessibles par requêtes (p. 317) ou acquisitions (chap. IV).

En ce sens, si chaque spécialiste peut être regardé comme un expert, l'attitude collective des experts est la même au plan des démarches scientifiques, des jugements décisionnels et vis-à-vis du champ écologique. L'expert devient alors un nom collectif pour décrire la position du chercheur - indépendamment de sa spécialité - dans les modalités de l'élaboration écologique.

Les opinions d'experts peuvent être totalement "arbitraires" - sans preuve objective, c'est-à-dire fondées sur une connaissance non préalablement explicite (on dit qu'il s'agit d'heuristique) - ou peuvent s'appuyer sur des démonstrations objectivées par des données et des propositions explicites.

Le développement rapide des Systèmes-Experts opérant sur des Bases de Connaissances interfaçables sur Bases de Données Relationnelles bouleverse assurément les pratiques écologiques. Au nombre d'entre elles, un abord logique de l'analyse des données écologiques, du plus complexe au plus simple (p. 367), après des assemblages et un formatage (p. 355), prépare les inférences avec prise de risques (p. 385) et infosystémique synthétique simulant pour réfutation les systèmes écologiques réels (p. 390).

Soyons francs, ceci ne facilite pas la rédaction du présent chapitre. Très largement les méthodes statistiques d'interprétation que nous pratiquons ne sont pas optimales. L'auteur de ses lignes, non statisticien, ne peut, ni veut, rendre compte de l'évolution en cours des statistiques.

Présenter un chapitre qui devrait faciliter l'orientation des écologues vers les outils les plus pertinents apparaît comme utopique en raison même de ces changements rapides. Ce guide relèverait plutôt d'une Base de Connaissances qui, semble-t-il, n'existe pas encore et offrirait une consultation optimisée des statisticiens intervenant dans cette base comme des experts.

L'objectif du chapitre sera donc de montrer quelques procédures classiques ou modernes, plus pour dégager les modalités générales d'exploitation des DICs que pour conseiller des méthodes précises, même si certaines semblent aujourd'hui comme importantes ou prometteuses.

6.2. Faits et hypothèses fondant la synthèse

6.2.1. Globalyse et champ écologique

L'interprétation vise idéalement à vérifier que notre connaissance objective du champ écologique est "totale", sous tous ses aspects.

Elle s'appuie sur la partie la plus solide de cette connaissance, les données directement issues de ce champ qui, après contrôle d'erreurs (DICs) en constituent la perception objective la plus complète : c'est la globalyse. Toutefois, ces DICs et leurs liens au champ ne représentent pas ce champ, elles n'en sont que la partie perçue après les options (ou hypothèses réductionnistes) d'acquisition. Les DICs de la globalyse ne sont qu'un maigre échantillon dont la représentativité, vis-à-vis du champ écologique, ne peut être testée que si les résultats issus de ces données prédisent une série de futures données qui seront effectivement vérifiables. Plus cette vérification est effectuée, plus les synthèses obtenues sont représentatives du réel (p. 41).

Pour apprécier l'écart entre globalyse et champ écologique, l'écologue complète les DICs par des hypothèses, tentant de compenser les effets délétères des options ; ce sont les propositions.

Ces propositions sont d'abord des tentatives de compléter les données manquantes ; ce sont aussi des moyens d'organiser ces données en modèles, d'abord en les rassemblant puis en les classant, ensuite en les ajustant sur des fonctions logiques (mathématiques) supposées représenter la réalité.

Enfin, ces modèles sont validés (comparés) au système de référence. En écologie, il y a écovalidation vis-à-vis des systèmes écologiques (p. 91).

L'interprétation portera donc essentiellement sur les DICs issues des systèmes écologiques et sur les propositions qui constituent les fondements de la synthèse.

6.2.2. Les propositions (ou hypothèses dans la synthèse)

L'interprétation, aussi modeste soit-elle, inclut donc des propositions qui tendent à compléter les données et à les ordonner d'après les "idées" que l'on se fait sur l'objet étudié.

Les propositions constituent le talon d'Achille de toute interprétation. Elles doivent être explicites pour pouvoir être réfutées. Parmi ces propositions certaines interviennent dans la manipulation initiale des ensembles de données pour les organiser en matrices (= propositions tabloires) et d'autres dans le traitement mathématique (= propositions inférencielles) de ces matrices. Le mot matrice est ici réservé aux tableaux de données organisés pour être mathématiquement traités directement.

I. Ijes suppositions (ou compléments hypothétiques)

Dans les démarches de synthèse, fondées objectivement sur les DICs, il arrive souvent que ces données fassent défaut. L'expérience du spécialiste, ou des observations indirectes convergentes, permet par hypothèses sur ces données manquantes d'en faire l'ajout à côté de données objectives. Ces suppositions introduisent des faits hypothétiques qui complètent les ensembles objectifs pour tendre à une synthèse plus générale. Les suppositions peuvent intervenir si nécessaire ultérieurement, à tout stade de l'interprétation telle que la modélisation par l'attribution de paramètres (par exemple, en fixant une constante K plausible dans l'ajustement d'une loi logistique, ...).

Les suppositions fragilisent particulièrement les synthèses. Elles permettent toutefois l'exploration d'étapes ultérieures et, dans une certaine mesure, de mieux cerner certains problèmes. Au plan scientifique, elles ne peuvent être qu'un artifice

témpora re et ne peuvent être très nombreuses ou cumulées dans des opérations successives sans conduire à de pures élucubrations. Les suppositions jouent un rôle majeur c ans la conception des microcosmes (p. 400).

2. I^es propositions tablataires

Avant tout traitement, les données sont mises en forme, c'est-à-dire formatées (p. 362) en tableaux pour traitement mathématique cohérent. Dans cette opération sur données (ou suppositions) diverses opérations sont pratiquées qui impliquent des choix hypothétiques ; ce sont les assemblages définissant les ensembles de données d'une caractéristique avant formatage en matrice.

Un assemblage sous-entend que les données regroupées dans un ensemble ont en commun la caractéristique de cet ensemble : leurs valeurs, quoique dissemblables, sont considérées comme appartenant à un même ensemble.

Ensuite, le formatage proprement dit comporte des manipulations non hypothétiques (telle la conversion) et d'autres liées à un choix hypothétique (inclusion d'ajouts, élimination, fusion, sélection, proration, allotement). Ces opérations se font *a priori*, p >ur ensuite être éventuellement vérifiées quant à leur pertinence. Il s'agit à la fois d'hypothèses et de démarches élémentaires dans les opérations de synthèse.

Ces propositions tablataires sont des choix qui n'ont pas trait aux options ni à des inférences logiques associées aux traitements mathématiques mais sont liés à la tablation des valeurs pour l'obtention des matrices avant ces traitements.

Les conséquences de ces tablations peuvent être appréciées ultérieurement. Elles peuvent être remises en cause puis corrigées avec des manipulations différentes à partir des mêmes DICs.

Tous les traitements de tablation n'introduisent donc pas des hypothèses mais ceux conduisant à accepter certaines hypothèses dans l'organisation de matrices avant les traitements mathématiques sont les propositions tablataires qui transforment les caractéristiques en critères et les prélevais en entités. Ces propositions tablataires s'apparentent aux options, en ce sens qu'elles s'effectuent avant toute interprétation numérique et sans inférence, mais en différent fondamentalement car s'appuyant sur des DICs et permettant leur transformation en DSEs, il est toujours possible de revenir sur ces hypothèses pour, avec les mêmes DICs ré-organisées différemment une nouvelle matrice.

3. Les inférences (prédicats, interpolation, extrapolation)

Ce sont les hypothèses inférencielles dans l'interprétation des ensembles de données.

Les prédicats (ou fonctions propositionnelles) sont des expressions logiques susceptibles d'être testées (comme vraies ou fausses). C'est l'hypothèse de travail au niveau de l'interprétation logique (au sens de la logique symbolique ou logique mathématique).

Il est hors de propos d'aborder ici la formalisation de tels prédicats qui, en pratique, se fait de toute façon par la mathématisation des interprétations logiques.

Ei'un point de vue opérationnel, pratique, les prédicats sont des hypothèses précises, émises au moment d'interpréter des données, et leurs liaisons logiques (qui sont des énoncés) pour tester leur adéquation aux faits. Ceci peut se faire sur une petite série de données conduisant à l'ajustement d'une fonction mathématique décrivant synthétiquement ces données. Il s'agit en systémique d'une description en fonction de l'espace, ou *versus* le temps ou les deux. Ceci peut résulter de l'usage d'une fonction de fonctions appuyée sur les ajustements découlant des données ou sur l'intégration de multiples fonctions en un modèle mathématique, complexe, factuel et testable (p. 401).

Après vérification positive ("vraie") ou relative ("vraie" en terme probabiliste) de la qualité de l'ajustement des données au prédicat, celui-ci devient une conclusion

acceptée... ; mais comme les conclusions scientifiques peuvent toujours être remises en cause, un prédicat confirmé temporairement reste constamment un prédicat vis-à-vis de nouvelles données.

D'une façon générale, l'inférence étend au non observé les propriétés établies depuis les données finies observées. Les prédicats, en formalisant des expressions mathématiques, englobent (ou plus exactement tendent à englober) les données initiales dans une fonction mathématique, par exemple une droite passant par plusieurs points et décrite par une fonction linéaire $y = ax + b$. On peut supposer que la fonction mathématique s'applique aussi entre les points observés ; il y a alors interpolation, c'est-à-dire inférence au non observé (= entre les points) dans le domaine d'observation des points. L'inférence issue de la fonction mathématique (prédicat) peut aussi être utilisée hors du domaine d'observation ; il y a alors extrapolation.

Dans l'exemple, déjà discuté paragraphe 6.1.2., des observations de FERRIERE (1985) (fig. 6.2.), le taux de ^{15}N des lombriciens observés certains jours a été d'abord interpolé entre dates pour établir une fonction qui a été admise ensuite par extrapolation comme hypothétiquement valide jusqu'au 60ème jour (extrapolation pour certaines simulations).

Le résultat du débit mesuré sur cette fonction interpolée sur 40 jours, acquis sur une espèce au stade adulte pendant une période printanière, a été ensuite extrapolé à l'ensemble de la population du même stade (adulte de *Nicotirilis longus*). On appelle aliquote un tel sous-ensemble spécifiquement étudié, supposé identique d'un tout et permettant ensuite d'extrapoler le résultat à ce tout.

De façon plus risquée (et donc sous un exposé conditionnel) et en l'absence de toute autre information disponible, on a supposé que les autres lombriciens avaient une fonction similaire, ce qui permet d'extrapoler par un calcul provisoire le débit observé à l'ensemble des vers de terre (p. 149).

4. Prévisions, prédictions et prognoses

Les résultats d'une démarche synthétique d'interprétation permettent de tirer les conséquences qui découlent logiquement de ces résultats. Ces déductions permettent de les contrôler par de nouvelles observations et ainsi de s'assurer de la généralité des résultats. Ce sont des hypothèses résultant de l'interprétation mathématico-logique. Ces déductions sont des prévisions ou prédictions.

Les prognoses sont des prévisions visant à une application précise. En général, elles résultent de travaux qui ont été effectués pour arriver à une synthèse permettant une prévision dans un domaine donné. Elles sont généralement l'extrapolation d'un constat d'état (diagnose) sur le futur (prognose) (prognose climatique, prognose d'infestation d'une épidémie, ...).

5. Ijes supputations et élucubrations

Issues du discours sur la Nature, ou de spéculations intellectuelles, les supputations sont des hypothèses peu (mais) réfutables recouvrant des domaines vastes, souvent flous (= mal identifiables). Alors que le terme élucubration, plus péjoratif, désigne des supputations probablement entachées d'erreurs, la supputation est une hypothèse risquée mais possible. Nous réserverons ce terme pour désigner les hypothèses ne jouant aucun rôle opérationnel, c'est-à-dire celles qui ne sont pas destinées, dans un terme prévisible, à être testées vis-à-vis des faits. Ces supputations sont malheureusement fréquentes dans de nombreuses interprétations.

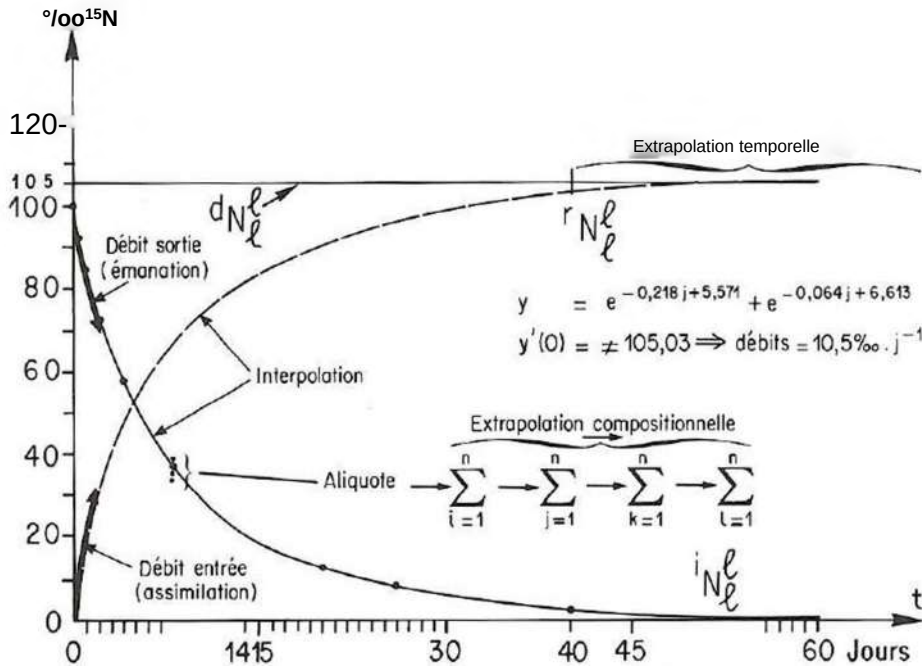


Figure 6-2 - Inférences des changements d'état à une cinèse, puis à divers compartiments. Les données objectives DICs (décroissance du ^{15}N : points) sont interpolées grâce à un prédicat (fonction $y = f(D)$ vis-à-vis des processus probablement de changement d'état entre les dates d'observations. Le calcul de la donnée (y') permet de calculer les débits relatifs à une unité d'azote (en %) d'émanation, et assimilation compensatrices. Ces résultats peuvent être extrapolés à l'infini (échange corporel total de ^{15}N par ^{14}N) dans le référendaire temps (et le référendaire espace, car il s'agit d'entrée-sortie d'un compartiment spatialement délimité... et mobile). L'extrapolation depuis l'aliquote du même, stade (i) à la même espèce (j) appartenant à la même catégorie écologique (k) inclus dans la taxocénose "lombricien" (l) a été effectuée vis-à-vis du référendaire composition.

6.2.3. Rôle opérationnel des hypothèses

Le rôle joué par les hypothèses est très diversifié en fonction de la qualité des résultats écologiques très recherchés. Certaines hypothèses ont un rôle opérationnel pour l'élaboration écologique des connaissances, tandis que d'autres ne jouent qu'un rôle littéraire ou social. Enfin parmi les hypothèses les options s'appliquent à l'acquisition des Données écologiques Initiales Contrôlées (DICs) et les propositions permettent l'interprétation de ces données.

Les options portent sur les choix d'acquisition. Par rapport au champ écologique total, elles appauvrissent l'information par sélection de quelques caractéristiques mais ne modifient pas intrinsèquement les DICs.

Les propositions jouent le rôle inverse : elles tendent à combler l'absence d'information sur les systèmes écologiques résultant des options. Ce sont les hypothèses interprétatives des traitements de synthèse de données. Elles sont les suppositions, les propositions tablatrices (assemblages, formatage) et les inférences

(prédicats, interpolation, extrapolation). Les prévisions (ou prognoses) sont les résultats (temporaires) des démarches synthétiques. Toutes ces hypothèses sont liées à l'analyse-synthèse et doivent être, à un niveau ou un autre, vérifiées pour connaître le degré de confiance que l'on peut accorder à celles-ci, c'est-à-dire à leur qualité.

Les supputations et leur forme extrême, les élucubrations, n'ont aucune fonction dans l'élaboration écologique mais jouent souvent, au niveau des relations médiatiques et sociales, un rôle non négligeable. Non directement opérationnelles, elles peuvent influencer dans le choix des problématiques puis des objectifs de recherche.

Il faut enfin reconnaître dans les interprétations, la part de décision d'expert prise hors du traitement statistique. Les opérations d'assemblage, de supposition et de prévision sont des hypothèses d'interprétation hors du domaine des applications mathématiques, alors que les inférences sont normalement associées à des opérations mathématiques.

Après les inévitables options et propositions tabloïdaires, les traitements n'impliquent pas d'hypothèses pour la plupart des statistiques descriptives quoique des choix de métrique (indices de distances, ROUX, 1985) doivent être faits par le spécialiste pour les créations de classes ou d'unités spatiotemporelles (krigeage, ...).

De même, en statistique stochastique, les seuils décisionnels doivent être arrêtés en tenant compte du contexte d'acquisition des données, face aux probabilités d'erreurs (propositions probabilistes). L'incertitude n'est pas la même dans une interprétation de données sur systèmes spontanés non contrôlés et sur DEPs issues de microcosmes rigoureusement standardisés.

Les propositions décisionnelles probabilistes et extrapolations sont inférencielles car elles tendent à étendre le domaine d'application des valeurs des matrices en généralisant leurs propriétés.

6.2.4. Nature et signification des données dans l'interprétation

Rappelons la définition restrictive du mot donnée (p. 266) : < **Une donnée est un atome (au sens littéral : insécable) d'information opérationnelle** >. Cet atome d'information revêt différentes formes déjà définies, par leurs propriétés techniques transitoires (prédonnées, p. 266), non contrôlées (données brutes, p. 290) ou continues (p. 291) (rendues nécessairement discontinues par la saisie informatique). Ces formes n'intéressent pas l'interprétation.

L'interprétation écologique porte essentiellement sur des Données Initiales Contrôlées (DICs, p. 266) constituant, par leur somme, la globalyse (p. 37).

Les données peuvent être classées en fonction de leur nature intrinsèque :

- les données quantitatives expriment des mesures sous forme numérique. Elles se prêtent directement à des manipulations mathématiques (24 g, 125 m, 760 mm de Hg, ...);

- les données qualitatives dénomment les qualités des objets : rouge, *Nicodrilus*, *Lolium*, solide, calcium..... Cette forme nominale oblige souvent à une transposition codée ;

- les données floues sont des données relatives à une vague référence indéfinie et qui de ce fait sont floues. Alors qu'un objet est en donnée qualitative, rouge ou non rouge, en donnée floue, il devient "assez rouge" "peu rouge". Des données floues peuvent avoir trait à des données apparemment quantitatives (exemple : plus grand que 20 cm) ou qualitatives (jeune, assez vieux, ...). Ces données floues sont susceptibles par divers artifices d'être traitées "comme des probabilités" mais le développement rapide des Systèmes-Experts, qui relie l'expert et son jugement intuitif, parfois flou, a montré les limites de ce genre d'artifices.

Les données floues sont assez fréquentes lors des jugements intuitifs sur les caractéristiques étudiées mais aussi dans les suppositions (p. 344) de l'expert. En

écologie, les données floues sont encore rarement traitées comme telles : voir cependant l'application de El-ShiSHINY et GHABBOUR (1987).

Le mot flou, ayant aujourd'hui une signification opérationnelle, sera distingué du mot obscur (et sa pratique intellectuelle l'obscurantisme), qui est l'inverse d'un fait utilisable : l'obscurantisme est une démarche anihilant l'élaboration scientifique.

Les données peuvent être interprétées à partir de différentes logiques :

- à partir d'une logique déterministe : une donnée est, aux imprécisions près, un atome objectif d'information sur le champ écologique. Cette conception est inévitable si l'on observe donnée par donnée et est certainement correcte à ce niveau ; elle peut devenir risquée lors d'inférences sur des ensembles de données que l'on résume par exemple par une moyenne,

- à partir d'une logique probabiliste. En considérant un ensemble de données susceptibles de décrire un tout, chaque donnée peut être considérée comme le décrivant plus ou moins bien, ou comme appartenant plus ou moins à cet ensemble. Sa probabilité d'appartenir aux paramètres de l'échantillon est alors calculable. A l'affirmation déterministe : la donnée A appartient à l'ensemble Z, se substitue la donnée A a la probabilité p % d'appartenir à l'ensemble Z (le raisonnement pouvant porter sur des ensembles d'ensembles). Le concept de probabilité est lié à des estimations numériques de fréquence (probabilité),

- à partir de la logique floue. Celle-ci fait intervenir le concept de possibilité associée à des perceptions intuitives et subjectives (non numériques) associant à une donnée des possibilités numériques. Par exemple : "très jeunes" exprime pour l'espèce humaine une possibilité faible d'avoir 50 ans et élevée d'avoir quelques mois. La logique floue s'applique au traitement numérique de ces données vagues. Cette logique, proposée par ZADEH (1965), inclut comme cas particulier les logiques déterministes et probabilistes (Remy ,1986).

On peut donc dire que si les DICs sont individuellement objectives par rapport au champ écologique, elles peuvent, selon les modalités d'interprétation et la nature des ensembles où elles sont assemblées, avoir des significations considérées comme relevant de logiques différentes : floues, probabilistes ou déterministes.

Les ensembles de données permettent toujours des comparaisons entre eux, des typologies où la proximité des éléments est jugée grâce à leurs variables indicatrices. On peut directement ou après (ablation (p. 359) et typologie (p. 367), aidé éventuellement de moyens de décisions (p. 384), classer les types et entités en classements ou classifications (p. 377). On peut également décrire ces types dans leur distribution spatiale voire temporelle (= couverture, p. 287). Evidemment chaque donnée appartient nécessairement à un système écologique mais les ensembles de données ne permettent pas toujours de décrire les relations morphofonctionnelles de ces systèmes.

S'il est toujours possible de faire un commentaire sur les systèmes naturels caractérisés et classés comme des objets, il est rarement possible d'interpréter ces systèmes en tant que système cohérent de compartiments et cinèses. L'analyse a éclaté et sélectionné quelques informations sur les systèmes écologiques et seuls des ensembles de données adéquats peuvent être organisés pour être mis en connexion systémique, permettant la reproduction interprétative par un modèle mathématique spécifique (infosystème) (p. 401) ; ce modèle pouvant ultérieurement produire des simulations fonctionnelles prédictives et validables vis-à-vis des systèmes réels.

Les ensembles de données en général se prêtent donc à la typologie, à la couverture et aux commentaires sur les systèmes écologiques sous-jacents mais seuls les ensembles connectés peuvent en outre contribuer à une véritable recherche par infosystème sur les fonctionnalités des systèmes écologiques (p. 357).

6.2.5. Approximations successives et lois

Un jeu continu d'accumulations de données, correctement répertoriées et référées au champ écologique, acquises soit fortuitement soit en fonction d'objectifs et enfin complétées de suppositions et interprétées à l'aide de prédicats, permet l'obtention de résultats. Ces résultats apparaissent eux-mêmes comme devant constamment être complétés et vérifiés et ne sont rien d'autre qu'une approximation temporaire : une prédiction.

L'étape suivante par contrôle expérimental ou par recoupement historique, permettra une approximation souvent meilleure, parfois différente mais normalement mieux assise... : il y a amélioration des connaissances écologiques par approximations successives. Ceci implique toutefois une très grande clarté distinguant d'une part les données objectives (— DICs) des interprétations, par essence hypothétiques, et d'autre part une claire expression de la plus ou moins grande fiabilité des (nombreuses) hypothèses permettant d'aboutir aux conclusions (p. 333).

Trop souvent, en "écologie", des conclusions sont confondues avec des acquis. Des hypothèses fragiles répétitivement affirmées prennent valeur de dogmes et un verbalisme rhétorique se substitue à la démonstration factuelle et rigoureuse.

Il y a en effet, en histoire naturelle, comme dans les sciences sociales, une forte tendance au verbalisme, en fonction de modes intellectuelles (REGNIER, 1974) qui sont peu sensibles au caractère quelque peu desséchant d'une démarche scientifique rigoureuse.

Il est rare que l'on puisse actuellement asseoir l'écologie sur des interprétations si bien vérifiées qu'elles acquièrent la force de loi scientifique ; c'est-à-dire de conclusions pratiquement définitives (pratiquement certaines, le doute devenant très faible) telles celles établies en physique, comme les lois de la pesanteur, certaines quant à leurs effets (et non leur nature).

L'évolution s'est exercée pendant des milliards d'années sur des systèmes thermodynamiques ouverts dans un environnement dont on a la preuve de sa modification et de la transformation des êtres qui y sont inclus (= évolution biologique). Cette évolution est peut-être la seule interprétation écologique (les organismes dans leur milieu) ayant force de loi, mais celle-ci est tautologique : l'évolution, c'est la transformation au cours du temps.

De même, la compétition, moteur de la sélection de systèmes écologiques, apparaît comme une conséquence des propriétés fondamentales de la matière (p. 69). En dessous de ces lois générales, les mécanismes biophysicochimiques globaux sont également inévitables (modification des codes biochimiques trans-générationnels) car ils en sont les corollaires.

Par contre, les mécanismes de sélection particuliers (d'un groupe végétal par exemple) dans un environnement spatiotemporellement précis peuvent être largement sujets à ré-interprétation particulière par de multiples spécialistes. Ces approximations locales, pur leur fondement même, ne peuvent engendrer de lois générales.

En fait, le développement des logiciels reliant données, hypothèses, opinions intuitives d'experts (y compris leurs expériences personnelles), actuellement en rapide évolution, permet de fondre en un tout constamment perfectible état des connaissances et de rendre en permanence moins incertaines les connaissances sur les systèmes. Si l'analyse des systèmes écologiques ne révèle aucune propriété (loi) spécifique (p. 105) de leurs composants, leurs complexité et connexités systémiques restent largement à explorer par approximations successives. Ceci peut et doit se pratiquer selon les deux seuls Processus Répétitifs d'Accroissement des Connaissances décrits aux paragraphes 6.3.2. et 7.1.3.

6.2.6. Contrôle des hypothèses ou réfutation

Les hypothèses à tous les niveaux ne peuvent être vérifiées (ou réfutées) que par de nouvelles données comparées à celles prédites par l'interprétation utilisant ces hypothèses. Ces nouvelles données peuvent provenir :

- a) de données antérieurement pré-acquises et accumulées dans une source d'informations (bibliothèque par exemple). L'existence de Base de Données Relationnelles (p. 319) optimise aujourd'hui l'accès rapide et total à toutes les données pré-existantes,
- b) d'une nouvelle série de DICs acquises dans le champ écologique.

La procédure de confirmation d'une hypothèse doit, cela est trivial mais indispensable, permettre de s'apercevoir qu'elle est vraie ou fausse. Certaines hypothèses ne se prêtent pas facilement à vérification, d'autres sont plus faciles à contrôler ; c'est la réfutabilité (possibilité de contrôle) de certaines hypothèses (p. 24).

Certains travaux définissent et portent sur des objets apparemment concrets (par exemple, le compartiment des herbivores) et leur fonction (consommateurs d'herbe) alors qu'en pratique, la mesure réelle (d'un tel compartiment "herbivore") oblige à des approximations quasi arbitraires (qu'est-ce que l'herbe ? part de l'herbe réellement "consommée" dans les ingestats totaux = notion d'herbivore ? quantité ingérée réellement dans le champ écologique par tous les herbivores ? etc..., <■/'. p. 160).

L'idée que l'on se fait des choses, permettant l'énoncé des hypothèses, est souvent éloignée des moyens de contrôle accessibles dans un terme prévisible. L'exemple ci-dessus n'est théoriquement pas insoluble... mais l'est pratiquement à notre époque. Afin d'éviter une dépense de moyens vers des objectifs inaccessibles de façon prévisible, une étude critique de la réfutabilité des hypothèses est indispensable. Celle-ci est non seulement théoriquement possible mais surtout pratiquement réalisable sans évacuation verbale des problèmes.

Notons que si le distinguo subtil entre réfutable et vérifiable est en pratique d'un rôle limité, l'appréciation (= la mesure) de la validité relative d'une hypothèse n'est pas quelconque. La longue liste de ces hypothèses (p. 267, 344) de nature et de fonction différentes montre la nécessité d'une perception des risques encourus à chaque "acceptation" d'hypothèses temporairement considérées comme "vraies".

Le contrôle des hypothèses peut se faire concrètement (fig. 6-3) par :

1) observations réitérées, par la constitution de nouvelles séries de données acquises dans le champ écologique, pour ce contrôle. C'est la voie directe d'accès à la connaissance de l'écosphère,

2) observations provoquées. L'hypothèse conduit à prédire des résultats dont on s'assure de la véracité par la réalisation d'une expérience. L'expérience étant un dispositif, pour partie ou en totalité, artificiel permettant d'observer des caractéristiques qui ne seraient pas observables sans cet effet de l'art (au sens technique).

En outre, du point de vue écologique, la critique de la signification des données acquises revient à savoir dans quelle mesure ces données sont effectivement issues du champ écologique ou ne sont qu'artefacts (produits de l'expérience inexistant dans un système non modifié).

Une distinction est ici introduite par certains auteurs : le terme expérience étant réservé aux dispositifs où tout est contrôlé pour suivre l'évolution d'un système artificiel, par opposition aux quasi-expériences où un système spontané reçoit un traitement (= une caractéristique) contrôlé avec observation de l'évolution spontanée du système ayant subi cet acte (ex traitement d'un champ agricole par un engrais). Notons que les quasi-expériences pourront être la reproduction d'un acte, intervenant (ou devant intervenir) dans le champ écologique ; ce sont des observations qui conduisent à des DICs alors que les "expériences", prises ici au sens étroit, ne sont

matériellement réalisables (si elles le sont : contrôle total ?) que de façon très artificielle hors champ écologique (cf. microcosme, p. 400) et ne peuvent que fournir des DEPs.

En pratique, deux modalités expérimentales se distinguent donc clairement d'une part les études de potentialités écologiques, et d'autre part des études d'effets écologiques.

2a) Les études expérimentales d'actes se font sur des systèmes écologiques qui ne sont connus que très incomplètement, par la globalyse de ces systèmes. Sur ces systèmes, un acte (p. 272) (ou une série d'actes) est appliqué(e) souvent en comparaison avec un système non traité jugé *a priori* comparable (le témoin). Il s'agit d'études comparatives de systèmes écologiques réels, objectivement étudiés par la globalyse de ceux-ci et dans lesquels les actes sont intentionnels. Ces actes jouent, par analogie avec les systèmes automatiques, le rôle de commande de ces systèmes. La compréhension des cascades de conséquences de ces actes est nécessairement très limitée par la globalyse mais l'information, sous forme de DICs, provient du champ écologique. C'est évidemment le cas des dispositifs expérimentaux au champ.

Les études expérimentales d'actes apportent directement une connaissance de la réalité écologique de leurs effets sur notre écosphère sous la forme de DICs.

2b) A l'inverse, les études expérimentales de potentialités visent à contrôler totalement (idéalement) un système artificiel pour en connaître les propriétés. Pour cela le dispositif est totalement connu, décrit et reproductible. C'est le microcosme. On sait que le fait de mêler NaOH + HCl produit NaCl + H₂O + Q. On sait que telle colonie bactérienne dans une solution nutritive renouvelée se multipliera suivant un coefficient r dépendant de la température. On cherche à savoir l'effet d'un facteur x dans un système artificiel.

Cette méthode expérimentale nous renseigne sur les propriétés du système créé par l'expérimentateur, mais nullement sur l'occurrence de celui-ci dans la nature. Il peut y être très fréquent (= important) ou ne jamais s'y produire. Cette méthode nous apprend les mécanismes qui ne manqueraient pas de se produire si ils existent. Les études de potentialités apportent une connaissance des processus possibles et alimentent notre réflexion sur les modèles conceptuels engendrant les Options d'acquisition. Ces mécanismes potentiels sont décrits par des Données Expérimentales de Potentialités (DEPs) qui peuvent être organisées en infosystèmes mimant les systèmes artificiels choisis. Par rapport au champ écologique ils constituent un niveau d'hypothèses supplémentaires par le choix des composants du système artificiel. Nous discuterons du rôle des microcosmes page 401).

3) observations recoupées. Celles-ci sont importantes pour les interprétations ayant trait au passé ; il est par définition impossible d'y réitérer une observation ou y développer une quelconque expérimentation déclenchant un phénomène qui s'y est produit : il reste heureusement le recoupement.

11 s'agit ici d'être très explicite : une interprétation conduite par reconstitution historique pouvant avoir des conséquences qui ne sont pas encore connues ; il y a alors possibilité de prédiction par rapport à ce que l'on ne sait pas encore de ce passé. De ce point de vue seulement la procédure de contrôle est réfutable et n'est pas biaisée. C'est à ma connaissance, le seul moyen d'assurer une scientificité aux études historiques, dont celles sur l'évolution passée des systèmes écologiques.

Il est toujours possible, en connaissant les faits, de décrire une histoire (en ce qui nous concerne ici, une histoire naturelle) cohérente avec ces faits (p. 237) ; il s'agit souvent de véritables explications opportunistes où les reconstitutions intellectuelles ne sont pas soumises à contrôle. Pour une réfutabilité, il faut de plus, à partir d'une reconstitution historique, en tirer explicitement des conséquences prédites avant leur éventuelle future découverte.

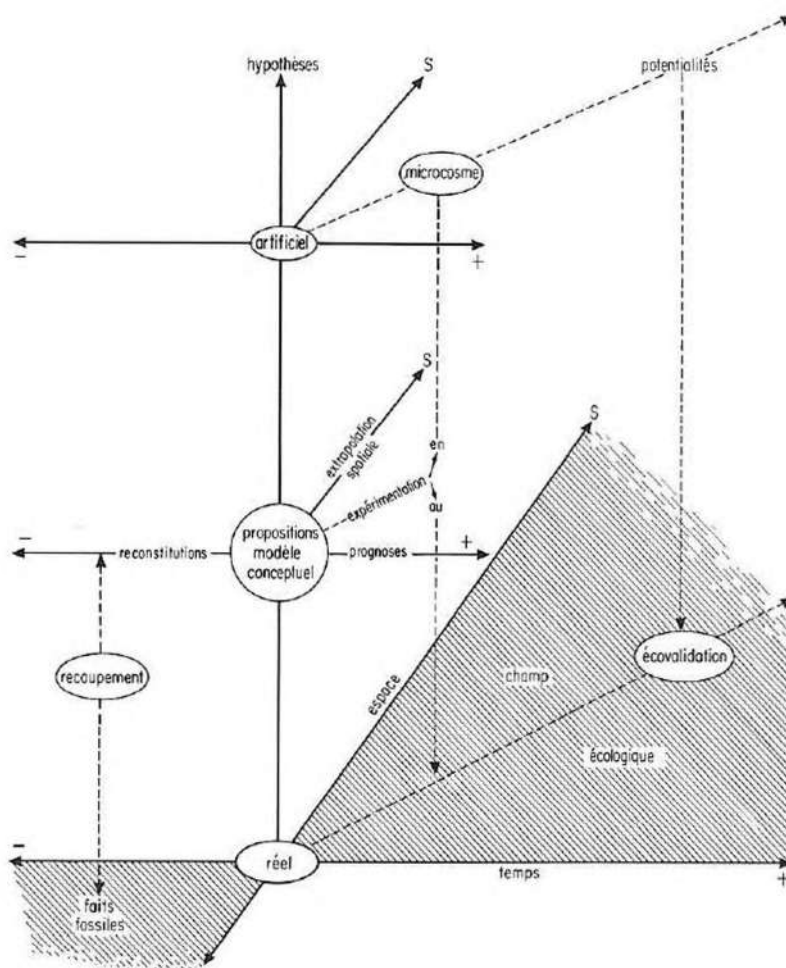


Figure 6-3 - La réfutation des interprétations se fait par prédicts de valeurs de caractéristique(s) (composition) non encore connues, à partir de synthèses fondées sur des données connues et des propositions (hypothèses). Ces prédicts peuvent être écov validés.

Par exemple, j'ai été amené, devant l'ignorance où je me trouvais, à explorer la France pour connaître les diverses espèces de vers de terre. Ces "espèces" (p. 254) étant reconnues et décrites, j'ai dû, comme l'obligent les règles de la taxonomie les classer en genres (si possible "naturels", mais aussi artificiels), voire en sous-genres. Pour publier les résultats, j'ai fait faire par ordinateur avec les moyens de l'époque (en 1970, un 16 K-octets !) une cartographie automatique de chaque espèce et sous-espèce.

J'ai dû collecter en transects à travers la France, selon des itinéraires routiers quasi linéaires et dépouiller (analyser) bien après ces voyages-collectes des animaux non identifiables au terrain. Je ne pouvais imaginer les aires de répartition de chacun

des 173 taxons observés dans 1600 lieux de capture. Les cartes automatiques furent donc ma première perception des aires taxonomiques.

A l'observation de ces cartes, regroupées par souci d'économie d'édition, je fus très surpris de constater que dans certains genres "naturels" les taxons infragénériques occupaient des aires distinctes, mais contiguës. Encore plus étonnant, les proximités morphologiques des organes sur les corps des animaux coïncidaient avec les proximités géographiques ! Une telle identité m'a semblé ne pouvoir s'expliquer que par le passé géologique des aires terrestres émergées. De fait celles-ci coïncidaient parfaitement avec la hiérarchie taxonomique (plus le taxon est général, plus l'aire correspondante est ancienne) avec une exception toutefois pour une "espèce" (*Scherotheca dugesi*). Celle-ci semblait établie depuis le Miocène (- 13 millions d'années) dans les Alpes "mais" possédait une sous-espèce en Corse (cf. fig. 2-23, p. 181). Les géologues consultés à l'époque refusaient toute possibilité de migration à partir des Alpes vers la Corse depuis le Miocène (BOUCHE, 1972). Je n'ai pas eu alors le courage, à partir de la répartition actuelle de vers de terre (qui n'ont pas de fossiles !) de rejeter l'interprétation des géologues travaillant sur des roches datables et témoins historiques.

L'année de publication de mes résultats, HSU (1972) devait montrer qu'il y a 6 millions d'années, au cours d'un "épisode messinien", la Méditerranée, devenue temporairement une mer fermée, avait perdu 1 000 mètres d'altitude... ce qui a permis la migration de *S. dugesi* en Corse, et depuis permis la différenciation de sous-espèces locales. Il est à remarquer que je n'ai pas prédict la nécessaire réinterprétation géologique comme conséquence réfutante de l'interprétation paléogéographique que je donnais pour les autres taxons et que je n'exploite ce fait qu'*a posteriori*.

De la même manière, j'ai depuis réinterprété la répartition mondiale actuelle des lombriciens. Cette étude a mis en évidence une prédiction réfutable par futurs travaux. Cette prédiction indiquait que la reconstitution de la Pangea n'était pas satisfaisante, au moins au début du Secondaire. La reconstitution "lombricienne" de la Pangea indiquait que l'Asie du sud-est était alors reliée à la Gondwana (entre "Inde" et Australie), en contradiction avec les interprétations géologiques du moment (BOUCHE, 1983a). Cette interprétation cette fois-ci comportait une prédiction explicite prévoyant une nécessaire ré-évaluation géologique. Celle-ci vient effectivement de se produire grâce à une coopération sino-américaine (LIN *et al.*, 1985) montrant la configuration géographique "lombricienne" dès la fin du primaire et validant ainsi l'interprétation morphofonctionnelle paléogéographique des répartitions actuelles de certains taxons.

Il y a lieu de souligner ici que pour qu'il y ait dans les recoupements réellement hypothèses et contrôles, il faut une expression explicite de l'interprétation et des conséquences prédictives qu'elle engendre. Il ne suffit pas de conforter *a posteriori* par replâtrages successifs une interprétation floue mais de produire explicitement l'interprétation et ses conséquences testables.

D'un point de vue opérationnel, nous retiendrons :

- 1) Les DICs sont fondamentalement et strictement objectives (p. 42).
- 2) Les interprétations, scientifiquement parlant, sont fondamentalement sujettes à caution : toute interprétation, même fréquemment vérifiée par ses conséquences, peut être remise en cause. En pratique, beaucoup d'interprétations sont fragiles, très hypothétiques ou/et partielles.

En conséquence, la méthodologie d'interprétation doit être fondamentalement

- 1) conçue pour être explicitement remise en cause à chaque acquis de données permettant de le faire,
- 2) organisée en approximations successives, toute interprétation étant une hypothèse à usage temporaire. <<Principles are doomed to early obsolescence while pure observations are never out of date>> (Robert MACARTHUR, légèrement paraphrasé par SVENSSON, 1979).

6.3. Préparation des synthèses

6.3.1. Améliorations des moyens de synthèse

Autant l'acquisition des données revient à prélever dans le champ écologique certaines informations analytiques, si possible avec des choix d'acquisition pertinents vis-à-vis d'objectifs définis, autant l'interprétation est une tentative pour résumer ces informations en une reconstitution synthétique idéalement unique depuis toutes les données acquises, idéalement représentatives de tout ce qui s'est passé dans ce champ dans l'espace-temps considéré.

Cet idéal n'est évidemment jamais atteint "parfaitement" mais l'interprétation doit tendre à l'atteindre. Elle doit synthétiser, en réduisant les multiples faits que l'analyse fournit, en expressions plus condensées et cette synthèse doit tendre à représenter le réel ; c'est-à-dire tendre vers la perception globale explicitement incluse dans la définition de l'écologie.

Pendant longtemps, les moyens techniques limités ont entraîné un réductionnisme analytique doublé d'interprétations limitées la plupart du temps à la comparaison de deux variables (la croissance en fonction du temps, l'aire de distribution en fonction de la température moyenne, etc...) : c'est la multiplication d'appréhensions morcelées de phénomènes "arbitrairement" présélectionnés. Alors que le champ écologique est, sous l'angle des caractéristiques analytiques, extraordinairement complexe, l'interprétation portait "arbitrairement" sur deux caractéristiques l'une considérée comme cause, l'autre comme effet de la première (en fait cet "arbitraire" avait une justification empirique plus ou moins fondée).

Cette approche causale bidimensionnelle a été prépondérante et reste culturellement, par facilité, la voie royale des démonstrations "évidentes". Elle est en effet, par son simplisme, la voie "facile" de l'orthodoxie doublée d'un développement épistémologique archaïque frustré où toute cause doit entraîner un effet, dont la réfutation sous cette forme est ancienne (p. 355).

Or cette interprétation "réduite" est (écologiquement) anti-scientifique pour deux raisons.

1) Tout phénomène écologique privilégié pour une étude explicative dépend de l'ensemble des caractéristiques de l'entour qui agissent directement ou indirectement sur celui-ci, car il n'est que composant d'un système plus général. Si l'une d'entre elles est supposée prépondérante, ce n'est qu'après avoir considéré cet ensemble de caractéristiques que l'on pourrait démontrer cette prépondérance, de toute façon relative.

2) Réciproquement, les caractéristiques écologiques "arbitrairement" choisies comme "facteurs" ne sont qu'un aspect du champ écologique, à la fois dans l'espace-temps, dans le niveau analytique, dans l'approche morphologique ou/et fonctionnelle.

Aujourd'hui, nos moyens de synthèse, en évolution rapide à la fois au plan "physique" (ordinateurs) et au plan opérationnel (logiciels), obligent à l'abandon de ces démarches qui ont prévalu si longtemps par limitations de moyens. Ou plus exactement, les moyens nouveaux permettent l'abandon d'un pis-aller qui suppléait la carence des moyens par le flair du spécialiste, flair intransmissible sans preuve formelle.

Pour l'élude des modalités qui président à l'explication d'un phénomène précis, il est maintenant possible de partir de toutes les données disponibles liées de près ou de loin à cette explication. Il faut interpréter le cas général avant les cas particuliers.

Les données soumises à interprétation souffrent d'insuffisances tenant à la partie restreinte du champ écologique pris en compte, aux limitations techniques et matérielles d'acquisition, voire à l'optique qui a orienté leurs acquisitions et biaisé ainsi la globalyse. (Nous verrons cependant qu'en ayant une information globale, il

est partiellement possible de corriger ces carences, p. 378). Nous risquons donc que toute interprétation porte, non pas sur une information relative au problème abordé, mais sur des données biaisées par rapport à ce problème ; une carence relative des données résulte des options. C'est inévitable, au moins évitons d'aggraver cette situation par des propositions inutilement restrictives.

Il est essentiel, à ce stade, de ne pas réintroduire dans l'interprétation d'autres présupposés :

- par l'adoption d'un modèle conceptuel découlant de faits. <<**Le modèle doit suivre les données et non l'inverse**>> (BENZECRI *et al.*, 1973),

- en restreignant l'étendue des données analysées par un choix *a priori*. <<**Il convient de traiter simultanément des informations concernant le plus grand nombre possible de dimensions**>> (BENZECRI *étal.*, 1973),

- en oubliant temporairement les choix qui ont motivé l'acquisition ou/et l'organisation de l'ensemble des données soumis à traitement. Ce sont les données qui doivent révéler les propriétés générales puis particulières et non les idées que l'on s'en est fait *a priori*,

- en ne choisissant pas des méthodes mathématiques restrictives de traitement.

En conséquence, a) <<pour l'analyse des faits complexes... l'ordinateur est indispensable, b) utiliser un ordinateur implique d'abandonner toutes techniques conçues avant l'avènement du calcul automatique>> (BENZECRI *et al.*, 1973).

Cette difficulté conceptuelle et opérationnelle, issue de l'inertie des pratiques face à un environnement technique en progrès rapide, est encore amplifié par le passage de l'informatique classique à l'informatique moderne (p. 341), cette dernière permettant la libre circulation des données (p. 317) et la synthèse itérative (p. 357, 424). Les usages en matière de traitements mathématiques, introduits fréquemment en routine, reflètent souvent une résistance épistémologique vis-à-vis de nouveaux outils qui, cependant, seuls permettent une approche pleinement écologique. L'écologue, de spectateur passif devant les outils, se doit de devenir acteur critique de la signification effective des moyens mis en oeuvre et acteur opérationnel par ses rapports avec l'intelligence Artificielle.

Plus exactement, les techniques pré-informatiques ou d'informatique classique (p. 341), par leur caractère limité, doivent être utilisées en dernier lieu car elles ne sont applicables qu'à des traitements séquentiels par dossiers successifs en raison de leur faible portée. Ce n'est qu'après avoir justifié, par une étude *a priori* non sélective, l'intérêt de focaliser sur certaines particularités d'un ensemble étudié d'abord globalement, qu'il est possible dans certains cas de mettre en oeuvre des techniques qui furent pratiquées avant l'1.A. opérationnelle, voire le calcul automatique.

De cette façon, l'écologue est amené, après une étude globale, à prendre en compte des ensembles de plus en plus focalisés, de moins en moins généraux. Il tourne le dos à la nécessité d'une écologie globale mais, procédant depuis un cadre global, il n'isole pas du général les conclusions particulières qu'il peut tirer d'études focalisées, car les partitions qu'il a effectuées résultent au mieux des propriétés connues de la globalyse.

11 peut, chemin faisant, être conduit à tester les hypothèses (= options) ayant présidé à l'acquisition des données.

Ce point est très important. Toute une tradition, issue des époques pré-informatique et d'informatique classique, conçoit des plans d'échantillonnage, des collectes de données et des traitements sur un nombre restreint de variables conduisant à des résultats écologiques risqués en raison de leur pauvreté et de l'étroitesse initiale de leur support informatif. Une différence peut être hautement significative dans une expérience particulière ; elle n'a de sens que vis-à-vis des quelques caractéristiques qu'elle prend en compte dans cette seule étude sectorielle et laisse tous les risques aux généralisations intuitives ultérieures (p. 438).

Très souvent, des options posent que telle caractéristique a une importance explicative, soit en raison de l'évidence (parfois trompeuse) d'un "facteur" limitant (l'eau dans les déserts arides, par exemple), soit en raison de l'héritage culturel de la période pré-informatique où seules quelques caractéristiques commodément accessibles étaient prises en compte, soit enfin en raison d'objectifs finalisés (e.g. étude de l'effet d'un déboisement).

Si ces options d'acquisition ont permis *ipso facto* de prendre en compte ces caractéristiques soupçonnées d'importance, il est souhaitable au moment des traitements initiaux de pratiquer une représentation "neutre" de toutes les caractéristiques pour considérer leurs significations réciproques et voir dans quelle mesure ces "facteurs", supposés importants, sont des caractéristiques contribuant de façon sensible à l'information sur le système observé. Ceci n'interdit pas dans l'étude d'ensemble (p. 367) et surtout dans des traitements stochastiques (p. 384) de rechercher la mise en évidence de telles caractéristiques "déterminantes". Cela évite, une fois les données acquises, de privilégier exclusivement l'hypothèse de départ sans tenir compte de la nature de l'information disponible.

Il est essentiel que l'objectif retenu soit largement multi-dimensionnel, lui-même inscriptible dans des problématiques générales et sur des données référées concrètement au champ écologique : une stratégie d'acquisition (p. 444) de la connaissance doit éventuellement et ultérieurement intégrer les anciennes pratiques. L'ensemble des données écologiques, incluant celles temporairement isolées en fonction d'un objectif particulier momentanément sélectionné à l'intérieur d'une problématique, doit être organisé pour être ensuite traité par une technique neutre par rapport aux options ayant conduit à la sélection des données de cet ensemble.

6.3.2. Les deux modalités itératives de synthèse, ou PRACs

Les moyens d'informatique moderne et notamment l'intelligence Artificielle permettent la mise en oeuvre des connaissances écologiques, du plus général aux cas particuliers, en y incluant un jeu d'hypothèses vérifiables par approximations successives. Seulement deux Processus Répétitifs d'Accroissement des Connaissances (PRACs) sont mis en oeuvre en écologie : la comparaison typologique et la systémique. Ces deux PRACs perfectionnent itérativement la connaissance par l'acquisition de données nouvelles, la vérification du bien fondé des interprétations entraînant l'amélioration de celles-ci. Tous deux portent nécessairement sur les systèmes écologiques mais l'une (la systémique) décrit les connexités systémiques validées aux systèmes réels tandis que l'autre (comparaison typologique) utilise cette propriété systémique pour identifier les systèmes. L'une décrit intrinsèquement les systèmes, l'autre les compare extrinsèquement.

La comparaison typologique décrit extrinsèquement, non pas avec toutes les propriétés reliant états et cinèses mais en considérant des objets à partir de caractéristiques aisément disponibles, généralement des variables d'état. En effet, les variables utilisées pour caractériser ces objets sont interdépendantes entre elles et avec les caractéristiques non décrites du système-objet. Chaque caractéristique prise dans le champ écologique ne répond pas au fréquent présumé d'indépendance, la présence d'une plante, d'un animal, d'un pH de sol, d'une vitesse d'écoulement d'eau, d'une température, etc. n'est pas indépendante de la latitude, du climat, de la pente, de l'exposition, de la roche sous jacente, de l'érosion, ... les relations entre caractéristiques sont multi-causales à la fois pour les expliquer et pour constater leurs "effets". En fait, les caractéristiques sont les modestes parties d'un système, dont elles sont le reflet intrinsèque (pour elles-mêmes), et extrinsèques dans la mesure où chacune reflète une partie du tout observable par d'autres caractéristiques. La caractéristique représente elle-même et reflète le système qui l'inclue : elle est nécessairement systémique (p. 91). Exemple : la présence de sang vif dans un vaisseau traduit extrinsèquement au moins une circulation, une respiration et un étal de vie. De la même manière, une espèce de plante traduit plus ou moins les

modalités d'un climat, un type de sol, une histoire incluant un mode d'exploitation humaine, etc. A l'exception des actes (commandes du système), imposés pour des raisons socio-économiques étrangères aux auto-régulations des systèmes écologiques, on peut dire que d'une façon générale les caractéristiques écologiques sont plus ou moins directement autocorrélées par le système écologique qui les relie.

Plusieurs informations partielles issues de caractéristiques différentes d'un même système reflètent ainsi, par recoupement, les caractéristiques du système qui n'ont pas été prises en compte. En considérant un système complexe, non totalement décrit, et les caractéristiques de la globalyse seules disponibles sur ce système, on peut espérer que ces dernières "échantillonnent"¹ toutes les caractéristiques du système : que le système est totalement caractérisé par les caractéristiques observées. Réciproquement, si nous avons un grand nombre de caractéristiques prises en considération celles-ci se reflètent mutuellement : il peut y avoir redondance plus ou moins complète entre caractéristiques prises en compte. Caractérisé signifie ici suffisamment décrit pour ne pas être confondu avec un autre système.

Cette comparaison des objets-systèmes se fait en appréciant dans un premier temps leur identité relative (= similitude relative, proximité) ou si l'on préfère leur différence relative. Ces écarts étant constatés ne permettent aucune synthèse : en décidant que des différences sont négligeables on identifie (i.e. considère comme identique) des objets à un type. Par contraste on décidera que d'autres objets sont trop différents et devront être identifiés à d'autres types. Le champ écologique étant un continuum à hétérogénéité variable (p. 95, 198) cette typologie a nécessairement une valeur conventionnelle attachée à des propositions décisionnelles. L'appréciation du degré de différence pourra se faire selon des propositions justifiées au cas par cas, comme par exemple en taxonomie, ou pourra s'appliquer sur une taxinomie (classification automatique, p. 37(5)). Ces choix de classes pourront s'appuyer sur des statistiques décisionnelles et devront toujours pouvoir aisément être remises en cause au fur et à mesure de l'Accroissement des Connaissances sur les objets considérés. La gestion en BDR de données objectives (DICs et leurs liens aux objets) facilite grandement la réinterprétation itérative de ce PRAC.

La systémique, décrivant intrinsèquement les systèmes, cherche à reproduire partiellement ceux-ci à partir des données disponibles en des modèles conceptuels (diagramme), physiques (microcosme) ou informatiques (infosystèmes) dont on s'assure de la validité par des simulations prédictives confrontées aux caractéristiques du système réel. Cette démarche complexe, qui sera décrite au paragraphe 6.6., oblige à des décisions conceptuelles (choix des compartiments et cinèses obligatoirement en connexité) expérimentales (variables manipulées), mathématiques (ajustements jugés acceptables ou rejetés).

Les modèles systémiques ne miment qu'imparfaitement et incomplètement les systèmes réels : ils doivent être remis en cause et améliorés itérativement dans le cadre du deuxième Processus Répétitif d'Accroissement des Connaissances.

Si la comparaison typologique s'appuie sur les statistiques descriptives et la systémique sur la modélisation, les deux PRACs, nécessitant, des décisions, peuvent faire appel aux statistiques stochastiques pour établir les risques probabilistes associés à ces décisions (fig. 6-4).

Notons que si deux PRACs utilisent les trois objectifs d'interprétation (comparaison, modélisation, décision) décrits au paragraphe 6.1.2., ils synthétisent les données issues des quatre options pré-interprétatives d'acquisition (échantillon, typologie, couverture et systémique) décrites au paragraphe 4.4.2. La constitution d'un échantillon ou la couverture d'une aire correspondent à des objectifs séquentiels qui ne se justifient plus que transitoirement dans le contexte de l'écologie moderne qui intègre les résultats de l'un ou/et l'autre PRAC : comparaison typologique (p. 367) et modélisation systémique (p. 390).

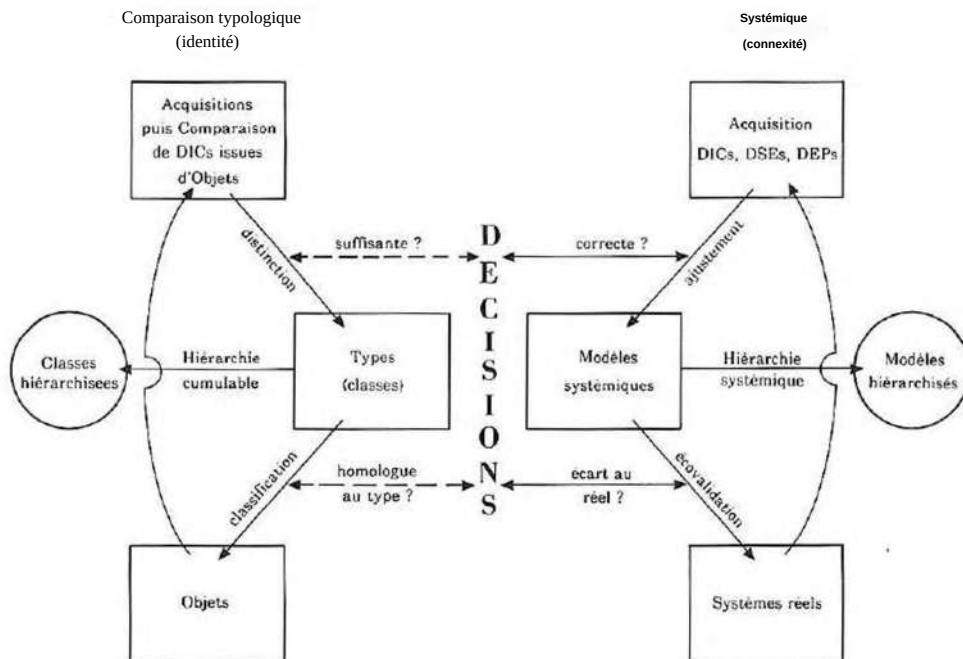


Figure 6-4 - Les deux Processus Répétitifs d'Accroissement des Connaissances. Les acquisitions d'informations depuis les systèmes écologiques sont soit considérées comme des objets identifiés, classés, hiérarchisés en comparaison typologique, soit comme des systèmes à compartiments et cinèses avec connectivité en systémique. A tous les niveaux, des décisions sont prises.

Ces deux PRACs sont complémentaires :

La systémique vise à connaître dans l'espace-temps les diverses caractéristiques décrivant les composants (compartiments et cinèses) des systèmes. Très exigeante en données de nombreuses caractéristiques, la systémique ne se pratique que sur un nombre restreint de composants d'holocénose(s) (subécosystème, voire synlégon) et souvent dans une seule holocénose étudiée intensivement. La généralisation de ce résultat coûteux ne peut se faire que par la typologie puis la couverture.

La typologie n'exige pas une connaissance exhaustive de chaque système, mais de disposer d'une information suffisante sur chacun pour le caractériser qualitativement, pour apprécier les différences (les distances) entre ces systèmes. On peut ultérieurement extrapoler l'information systémique aux systèmes de même type que celui qui a fait l'objet d'une étude intensive. Ainsi l'on interpole la systémique grâce à la typologie.

6.3.3. Tablation

1. Modalités

Sauf suppositions, les données sont toujours interprétées en fonction d'autres variables : en fonction du temps, de l'espace ou d'une autre caractéristique. Il y a toujours, au moins, une série de données interprétée en fonction d'une autre série de données, dans le cas le plus simple une série de x et une série de y.

En écologie chaque donnée est issue d'un état ou d'une cinèse, ou d'une différence d'états ou cinèses entre deux prélèvements, repérés eux-mêmes temporellement par des caractéristiques de situation. Fondamentalement, les données sont donc des valeurs d'un prélèvement ; on peut décrire différentes particularités d'un prélèvement et présenter celles-ci successivement en plusieurs colonnes d'un tableau.

On peut enfin affecter à chaque prélèvement successivement une ligne (fig. 6-6, p. 363). Cette présentation initiale de DICS n'est pas intangible : on peut "basculer" le tableau ou placer les caractéristiques du référendaire composition en ligne et le référendaire espace ou/et temps en colonne, etc. Si les données peuvent aussi être présentées en plus de deux dimensions, en pratique les traitements partent de matrices à 2 dimensions (n lignes, p colonnes, avec parfois $n = 1$).

De façon moderne, après la définition d'un objectif de recherche concret, on recherche les données souhaitables en BDR et, seulement si nécessaire, on effectue une acquisition de données (DICs) gérées finalement en BDR. Puis on effectue, après requête et acquisition mais avant traitements mathématiques, une organisation des tableaux de données pour les présenter de façon adéquate par les traitements envisagés. La tabulation est cette étape de travail caractérisée par l'arrangement des données en tableau(x), y compris en modifiant la nature des données. Elle se situe entre la BDR et la constitution du tableau qui sera traité (= matrice) par un programme algorithmique. La tabulation regroupe donc toutes modifications par prétraitements effectués sur la forme et le contenu des tableaux avant le traitement mathématique proprement dit. Le dernier tableau réalisé soumis au traitement sera appelé la matrice. Le premier tableau constitué de données obtenues sur requêtes en BDR sera le tableau initial.

La première opération sera donc de grouper les valeurs d'une caractéristique retenue parmi d'autres dans un objectif de recherche : c'est l'assemblage d'un ensemble. La deuxième sera d'ordonner les ensembles entre eux en tableaux (p. 361) puis les valeurs elles-mêmes peuvent être mises en forme (p. 362).

Au cours de la tabulation différentes hypothèses de travail sont retenues pour manipuler les données, les ensembles de données et l'organisation en tableaux de ces ensembles. Ces propositions ne sont pas inférentielles car elles n'établissent aucune généralisation. Elles peuvent toutefois modifier fortement les résultats (fig. 6-5). Ces propositions tablatrices, à la différence des options qui ne modifient pas la valeur intrinsèque des DICs, modifient, si nécessaire, les valeurs des tableaux. L'appréciation des effets de ces propositions ne peut guère se faire que par comparaison de matrices issues du même tableau initial mais obtenues en faisant varier les propositions tablatrices.

L'appréciation de ces propositions - essentiellement subjective comme celle des options et propositions inférentielles - peut s'appuyer sur des traitements probabilistes (p. 387) mais relève *in fine* de l'opinion d'expert.

2. Assemblage des données

L'interprétation écologique se fait sur des données, complétées si nécessaire par des suppositions (p. 344), présentées en tableaux croisant des variables (terme générique) dont certaines sont des indicateurs (terme général) décrivant des éléments (terme général) par des valeurs (fig. 6-6, p. 363 et fig. 7-3, p. 434).

Les DICS présentent l'énorme avantage d'être les données les plus objectives possibles surtout si des règles simples dans l'acquisition ont été respectées : essentiellement options d'acquisition optimales (p. 265) et référentiel des données par rapport au champ écologique (p. 216) voire modalités d'associations (p. 282).

Les DICS présentent par contre l'inconvénient d'être par définition le niveau analytique le plus fin, donc d'être quantitativement nombreuses : elles constituent une information non condensée. Enfin, une donnée isolément n'a aucun sens. Il y a

donc lieu de constituer des ensembles de données puis de travailler à l'étude des propriétés de ces ensembles. L'assemblage est la constitution d'un ensemble de données d'une caractéristique dans le cadre d'un objectif de recherche.

L'assemblage est une proposition tabloiratoire car c'est une hypothèse supposant que les données de l'ensemble créé ont une signification globale.

Les données acquises sont indépendantes des objectifs initiaux (p. 294) et toute donnée peut être réutilisée pour de multiples interprétations sur simples requêtes. Ces dernières sont des instructions rédigées pour permettre d'extraire d'une BDR l'information souhaitée (p. 325). Par exemple, les DICs de la base ECÛRDRE sont utilisées de façon totalement indépendante des objectifs d'acquisition (**tableau 5-1**).

Une interprétation peut demander la requête d'une masse importante et complexe de données. Par exemple, la comparaison typologique d'écosystèmes de Belgique, entreprise en coopération, conduit à étudier 322 critères observés sur 199 points d'observation (entités) soit 64 078 valeurs. Ces variables portent sur des données écologiques de l'espace-temps "Belgique période 1972-1973".

De tels ensembles peuvent être subdivisés en sous-ensembles ; dans l'exemple ci-dessus, on peut sélectionner les seuls critères ayant trait aux végétaux, eux-mêmes subdivisés en sous-ensembles (les critères portant sur une espèce) encore subdivisés (cette plante à l'ouest de Bruxelles), etc.

Les DICs une fois extraites sont rarement utilisables en totalité sous leur forme initiale et il y a nécessité, en ne perdant pas les DICs (conservées en BDR) de passer à des Données Secondaires Elaborées (DSEs) plus performantes pour des traitements mathématiques finalisés.

3. Entités et critères

Après requête pour une étude on dispose, issues de la globalyse, de DICs de prélèvements. Ces DICs ne sont souvent pas utilisées telles quelles mais après une certaine "redéfinition" des lignes et des colonnes des tableaux.

Cette redéfinition va conduire à considérer en lignes des entités et en colonnes des critères choisis pour décrire ces entités.

Les entités peuvent-être issues de diverses sources, ce peut être, entre autres,

1) des prélèvements regroupés : on considère seulement la moyenne des valeurs d'une caractéristique de l'ensemble des prélèvements regroupés. Par exemple, les valeurs moyennes du nombre d'individus d'une espèce d'insecte observée dans 100 faciès de végétation différents (= 100 valeurs moyennes), chaque valeur étant issue d'un échantillon de 10 à 20 prélèvements. Les (ensembles de prélèvements par) faciès sont les entités, le critère est une "valeur moyenne" ;

2) des caractéristiques de prélèvements dont on veut étudier des valeurs liées. Par exemple, on veut étudier les variations pondérales individuelles des divers adultes de chaque espèce de lombriciens issus d'un échantillon de prélèvements : chaque espèce-adulte devient l'entité (ligne) et chaque poids individuel (colonne) devient le critère ;

3) des caractéristiques regroupées. Par exemple, depuis le cas précédent, on peut, ne pas considérer chacune des espèces comme l'entité, mais ces espèces regroupées en catégories écologiques ;

De la même façon, les critères retenus pour servir à l'interprétation varient beaucoup, ils peuvent par exemple être issus :

1) de la transformation d'une caractéristique en plusieurs critères : c'est le cas de la transformation de données quantitatives en qualitatives par allosement en choisissant les bornes des lots (p. 363). Par exemple, l'altitude des prélèvements peut être transformée en critères qualitatifs : planitiaire (0-100 m), piémont (100-500 m), montagnard (500-2 000 m), somital (2 000-5 000 m) ;

2) de la fusion de caractéristiques en un critère, telle la prise en compte en présence-absence de *Carabidae* et non de chacune des espèces de *Carabidae* ;

3) d'anciennes entités lorsque l'on cherche à interpréter d'anciens critères à partir de celles-ci ; notamment par inversion de tableau.

On voit qu'à l'organisation du tableau initial des données en prélevais x caractéristiques se substitue après réaménagements une matrice entités x critères dont les valeurs sont celles des DICs ou sont des DSEs issues de ce réaménagement (moyenne, présence-absence, différence, etc.). L'objet de ce travail de tablation étant d'aboutir à une matrice servant à une ou des interprétations des entités à partir de critères retenus. L'usage fréquent en biométrie du terme "individu" pour désigner les entités n'est pas souhaitable, car comme dans les exemples montrés ci-dessus l'interférence avec le vrai concept d'individus (au sens du dictionnaire et des biologistes) est inévitable en Intelligence Artificielle.

4. Formatage des données (fig. 6-5)

Le formatage, ou mise en forme, a pour objectif d'organiser, souvent de simplifier, voire de compléter à l'aide de suppositions diverses, les données pour permettre leur traitement logique (au sens de la logique formelle) et mathématique. Parmi ces opérations, il y a les éliminations, les ajouts, les allotements, conversions et prorations. Toutes ces opérations peuvent être constamment reprises, à partir des DICs ou de DSEs, à tout moment lors des interprétations.

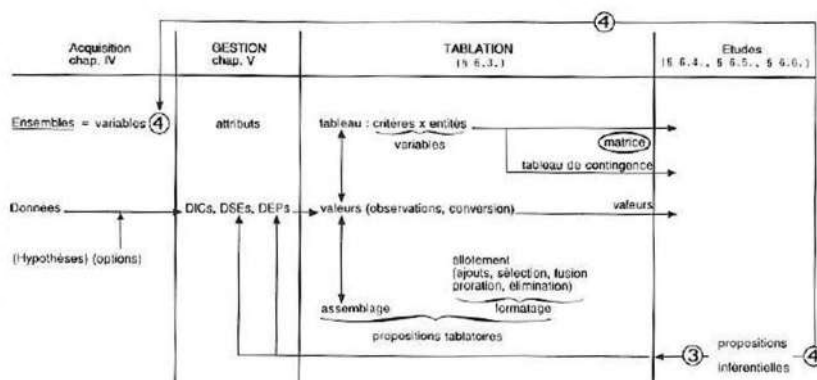


Figure 6-5 - *Tablation : Traitements initiaux des données pour constituer les matrices soumises à études mathématiques et critiques (voir fig. 4-3, p. 284 et 5-2, p. 311).*

A. L'observation critique et directe des données (fig. 6-6)

Les données regroupées en tableaux ne peuvent être utilisées d'emblée pour une prise de conscience de leur nature et de leurs anomalies. Celle-ci peut se faire par l'étude, variable par variable, avec des calculs simples ; calcul de moyennes, écarts-types, pourcentages ou par paire éléments/indicateurs (corrélations, histogrammes). Ceci peut conduire à la recherche systématique d'anomalies, qui sont souvent des erreurs apparues dans l'acquisition des données (confusion, erreurs typographiques, erreur d'unité de mesures, de référence numérique, etc.). L'utilisation systématique de logiciels de saisie conduisant à une BDR ayant ses propres moyens de détection de conformité et d'intégrité limite fortement ces aléas.

L'observation directe des distributions permet d'attirer l'attention sur les valeurs s'écartant sensiblement de la moyenne de celle-ci. Par exemple, dans une série de valeurs pondérales dont les autres valeurs sont comprises entre 2 et 8 g une valeur de 0,02 mg (ou de 80 g) indique à l'évidence une erreur. De même la projection graphique des coordonnées de distribution d'une espèce (longitude x latitude) sur une carte révèle parfois des animaux terrestres dans la mer (par exemple à la suite de

l'erreur entre longitude ouest et est), ou encore un point isolé hors de l'aire observée (valeur peut-être exacte nécessitant un contrôle attentif).

B. Les éliminations

Les données ainsi observées conduisent donc à des corrections (lorsque l'on peut reconstituer la cause évidente d'erreur) ou à l'élimination de données aberrantes vis-à-vis de l'ensemble étudié (donc de l'objectif retenu), aberrantes ne signifiant pas nécessairement erronées. Remarquons que l'on ne peut guère à ce stade que détecter les anomalies des DICs qui offrent par rapport à une distribution un caractère anormal, au sens de cas éloigné de la norme ; les erreurs se situant dans une distribution attendue et observée ne peuvent être détectées. Enfin l'élimination/correction de valeurs peut parfois être délicate : entre l'anormal et le normal, il y a une continuité d'autant plus difficile à trancher que le nombre de DICs observées est réduit.

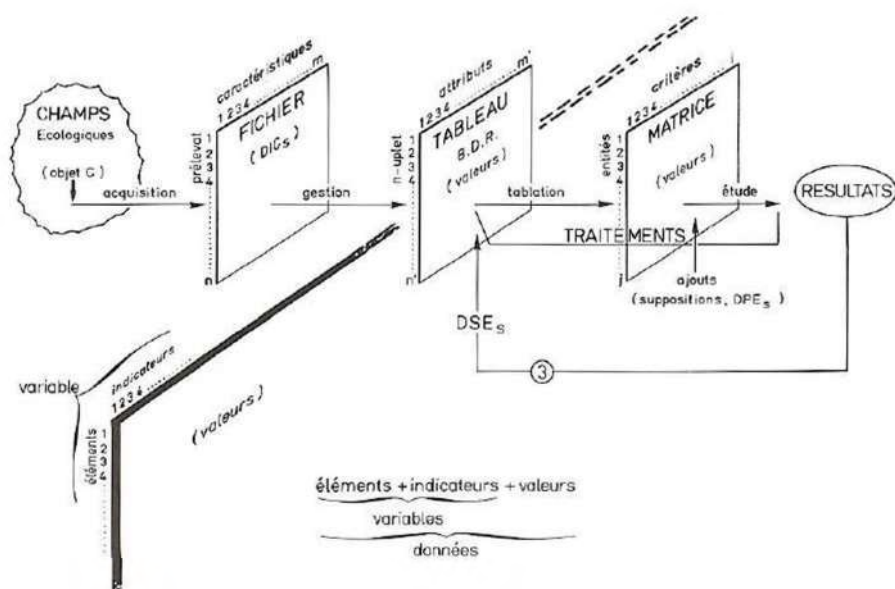


Figure 6-6 - Du champ écologique à l'étude des acquis. D'une façon générale, les données sont présentées en tableaux, des éléments étant décrits par des indicateurs. Les données sont toutefois réarrangées depuis le champ écologique en fichiers prélevés x caractéristiques, tableaux de BDR n-uplets x attributs et préparés pour chaque traitement en matrice entités x critères. Les valeurs et choix d'éléments ou d'indicateurs étant transformés (cf. fig. 7-3, p. 434).

C. L'allotement

Cette opération transpose sous une forme simplifiée (lot) des indications initialement décrites sous une forme plus complète. Cette tablation conduit à la constitution de lots à partir de valeurs dispersées. Chaque valeur initiale est à attribuer à l'un des lots pré-établis. Les lots ont des bornes les délimitant. Toutes les valeurs détaillées situées entre les bornes d'un lot perdent leur précision par l'allotement puisqu'elles prennent toutes la même valeur : celle du lot. Par exemple, les différentes variétés morphologiques d'une espèce trop peu représentée dans un ensemble statistique sont regroupées en une seule espèce.

A ce stade de la tablation, il est fréquent de parler de codification, ou de constitution de classes. Ces deux termes sont imprécis : la codification revient à coder

tout, objet écologique, toute caractéristique ou toute variable sous une identité conventionnelle. Elle est une gestion banale intervenant dès l'acquisition des données (par exemple en effectuant un marquage selon un code) et à tout stade de l'interprétation. La classe est un cadre permettant un classement (cadre pré-établi) ou résultant d'une classification déterminant le cadre où les valeurs sont ordonnées.

Pour cette mise en forme des données, le mot lot est ici préféré à l'usage fréquent du mot classe afin de réserver le mot classe pour désigner les résultats d'un travail de classification ou de classement (p. 377) effectué après études des données. Le vieux mot jurisprudentiel allotement est ici réutilisé pour cette opération.

En allotissant on peut être amené à coder les lots ainsi créés. Par exemple, les valeurs numériques d'une série allant de 0 à 40 (0,3 ; 0,4 ; 1,2 ; 1,6 12,2 ; 14,5 ; 39,2) peuvent être alloties en 8 lots (codés de A à H) de même largeur (0 - 5 ; >5 - 10 ; >35 - 40) ou de même effectif (nombre de valeurs). Il y a perte d'information en ce sens que les "détails" à l'intérieur des lots sont effacés dans ces DSEs (pas les DICs évidemment conservées en BDR). C'est la raison pour laquelle, aujourd'hui, l'allotement avant la saisie des données doit être proscrit car il introduit des hypothèses inutiles (propositions) au moment des options d'acquisition (p. 290). Les différentes modalités possibles pour effectuer les allotements sont maintenant bien connues et éprouvées (ROUX et GUITTONNEAU, 1977 ; BENZECRI et BENZECRI, 1980).

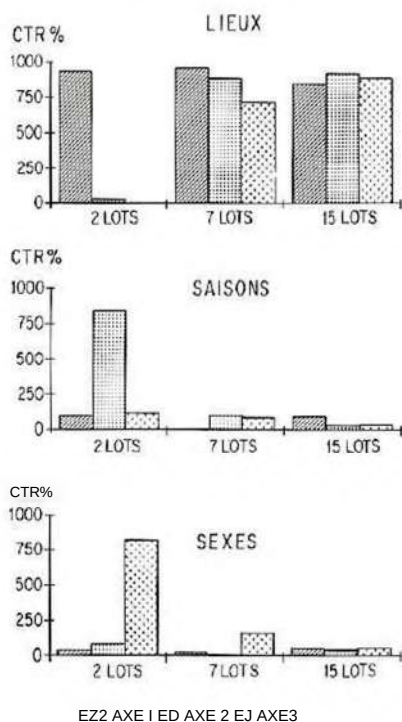


Figure 6-7 - Poids des modalités d'allotement dans une analyse multivariée portant sur le régime alimentaire de la Récasce des bois, les caractéristiques des lieux de capture et des oiseaux étudiés. La contribution (CTR) des critères lieux, saisons et sexes sur le premier axe factoriel n'est importante que si les entités sont classées en deux lots. Les autres allotements gommant l'importance descriptive des critères saison et sexe (d'après GRANVAL, 1988).

Le choix des diverses modalités d'allotement n'est pas neutre vis-à-vis des futurs résultats et modifie le poids des caractéristiques alloties. Ainsi Granval (1988) a étudié l'allotement de la variable "lieu" en trois modalités (2, 7 et 15 lots) et les conséquences sur la contribution de ce critère et de deux autres critères pauvres en lots, maintenus constants (sexe = 2 ; saison = 2). La figure 6-7 illustre les conséquences des trois modalités d'allotement choisies. ROUX et MONTANA (1988) ont récemment analysé ce problème.

D. Les conversions

11 s'agit de modifications de la forme initiale des données, par exemple la conversion numérique d'une série de valeurs par une constante (changement, d'unités, masse de matière humide changée en masse de matière sèche, en supposant constante un taux d'eau de x % ; expression de dénombrements de populations en pieds carré, convertis au m² ; changement de dénomination, ...). D'une façon générale, on réservera en écologie le mot transformation aux changements des formes concrètes du champ écologique (p. 46) et l'on utilisera conversion pour ces changements "à une constante près". 11 ne s'agit pas d'une proposition (hypothèse) mais d'un choix de présentation qui ne change pas la valeur informative des données. Toutes les conversions numériques ne se font pas à une constante près mais d'après diverses lois mathématiques classiques (dites souvent "transformations", mais il n'y a pas changement de forme de l'objet écologique mais seulement de la métrique) "transformant" les données grâce à une conversion probit, logarithmique, géométrique, ... Les valeurs sont alors recalculées selon une fonction.

E. Les sélections et fusions

On peut être enfin conduit sur un tableau IxJ à sélectionner au moins temporairement un sous-ensemble l'xj' (ne comportant qu'une partie des I éléments ou/et des J indicateurs). A l'inverse, un tableau IxJ peut recevoir par fusion des valeurs d'éléments I' ou/et d'indicateurs J' d'un autre tableau l'xj". Ces opérations de fusion ou sélection se font aisément en BDR et beaucoup plus lentement par manipulations de fichiers informatisés.

F. Les ajouts

Ce sont des suppositions (p. 344) "complétant" les données observées en l'absence d'informations objectives. Elles peuvent être des séries numériques supputées ou empruntées à une autre étude. Elles peuvent aussi être des déductions approchées du réel à partir d'autres informations.

G. Les prorations

Il s'agit d'une création partielle d'information en supposant une précision qui n'a pas été initialement obtenue au niveau de l'acquisition des DICs. Cette supposition s'appuie sur l'analyse de la partie précise des données puis sur l'attribution des imprécis au *prorata* de la distribution des valeurs précises. Exemple : dans une mesure quantitative de lombriciens on a identifié :

15 *Lumbricus rubellus* adultes : masse totale : 2 212 mg

10 *Lumbricus castaneus* adultes : masse : 245 mg

21 *Lumbricus* sp. 'juvéniles (non identifiées) : masse : 252 mg

3 *Allolobophora rosea* : masse : 645 mg

1 individu non identifié (*Lumbricidae*) : masse : 210 mg

Ici, l'individu non identifié est supposé appartenir avec la même probabilité à tous les *Lumbricidae* observés en nombre et poids et les dénombrements deviennent respectivement $15 + 10 + 21 + 3 = 49$; *L. rubellus* — $15 + 15/49 = 15,3$; *L. castaneus* $10 + 10/49 = 10,2$; *A. rosea* $3 + 3/49 = 3,06$; dito pour les biomasses.

A nouveau les précisions insuffisantes au niveau de l'espèce permet de ventiler au prorata les juvéniles indéterminés de *Lumbricus* sp. ? à l'ensemble des *Lumbricus* déterminés (21/35ème ajoutés à 15/35ème *L. rubellus* et 10/35ème à *L. castaneus*).

La proration réduit la complexité de l'information en supprimant les ensembles "*Lumbricus* sp." et "non identifié" mais suppose hypothétiquement que l'individu non identifié est représenté dans le prélèvement ou/et qu'il y a proportionnalité avec ceux présents et identifiés. Cette méthode ne déforme pas les proportions observées au niveau analytique mais suppose que ce qui n'a pu être identifié précisément est proportionnel à ce qui l'a été exactement. On pourrait éventuellement adopter des prorations selon des répartitions non proportionnelles sur la base de connaissances antérieures établissant des distributions moins simplistes. La distribution proportionnelle est souvent retenue pour sa simplicité et son hypothèse minimale.

5. Organisation de matrices (ûg. 6-6)

Après assemblage (p. 360) et formatage (p. 362) les informations se présentent sous forme de tableaux entités x critères contenant les valeurs (DICs, DSEs, DEPs) mises en forme pour une interprétation précise. Nous avons alors des matrices de i entités par j critères donnant ij valeurs. Certaines valeurs ont une fonction purement technique (numéro de prélèvement, d'un individu) et n'ont donc aucun sens écologique. De même certains repères techniques, tels les coordonnées temporo-spatiales, les codes d'identificateurs, n'ont par eux-mêmes qu'une valeur de lien. La date peut être liée à une saison mais ne décrit pas celle-ci, l'altitude ou la latitude peuvent traduire le climat mais ne décrivent pas celui-ci. L'écologue conservera comme élément d'interprétation ces repères techniques (codes arbitraires ou repères temporo-spatiaux) par exemple comme étiquetage des entités ou pour constater *a posteriori* un regroupement par région, ou par altitude, ou par saison. Ces valeurs techniques seront en "analyse de données" essentiellement des "données supplémentaires" reclassées comme éléments expliqués par les valeurs traitées par algorithmes. Ces dernières valeurs appartiennent aux variables actives.

Il faut généralement éviter d'introduire des critères contenant l'interprétation de critères contigus dans la même matrice (par exemple, le classement phytosociologique de l'association végétale décrite par ailleurs par les relevés de végétaux). Toutefois, ces "préclassements" anté-ordinateurs peuvent être également testés comme "variables supplémentaires" c'est-à-dire non actives (informantes) dans l'étude, mais passivement comparées dans celle-ci.

Les tableaux peuvent enfin être sous deux formes :

1) tableau disjonctif complet des entités x critères (souvent dénommé individus x caractères) où les valeurs des divers critères se rapportent à des entités. Pour les données quantitatives, les valeurs des caractéristiques sont indiquées (Ex : pH d'un sol — > 6,5). Pour les données qualitatives ou floues, chaque modalité de la caractéristique (vert, jaune, brun, vieux, ...) est énoncée et acquiert deux états () (= non brun) ou 1 (= brun). On peut enfin allier une donnée quantitative (tel le pH) en variables qualitatives en définissant des lots ; les valeurs alloties sont alors par exemple des lots $\text{pH} < 3$, < 4 etc. qui peuvent être mis sous forme disjonctive,

2) tableau de contingence sur variables qualitatives (y compris quantitatives alloties). 11 porte sur la co-occurrence de deux modalités de variables qualitatives dans une série d'éléments (22 fois des éléments ont en commun des modalités identiques dans deux indicateurs, etc.). On croise alors dans les tableaux deux séries d'indicateurs en créant un nouveau tableau (de contingence) où les valeurs sont les fréquences de co-occurrence dans les éléments initiaux. Ces éléments croisés jouent alors alternativement (à un basculement près) le rôle d'entités et de critères du tableau de contingence.

La préparation des tableaux de données sur les systèmes écologiques porte à la fois sur des données qualitatives, quantitatives ou floues, toutes pouvant, après allosement ou non, être décrites en tableaux disjonctifs complets ou/et en tableaux de contingence qui joueront un rôle clé en écologie descriptive. Par contre, les données quantitatives doivent être conservées dans leurs valeurs particulières pour la modélisation mathématique et l'étude stochastique décisionnelle.

Toutefois des conversions peuvent être pratiquées car elles permettent ultérieurement une facilité de traitement (conversion logarithme, probit,...). Par exemple, pour faire une analyse de variance, il est nécessaire que la distribution des valeurs soit normale et surtout que les variances autour de chaque moyenne soient entre elles suffisamment égales. Une étude de la régression de chaque variance en fonction de chaque moyenne peut révéler une relation linéaire ; dans ce cas on choisit la conversion racine carrée des valeurs comme étant la plus adéquate pour permettre ensuite l'analyse de variance (LEBRETON, comm. pers.).

6.4. Comparaison typologique

6.4.1. Choix de l'étude descriptive

Avant toute interprétation il faut "avoir connaissance" des données d'un ensemble présentées sous forme de matrice (p. 360). C'est-à-dire essayer de dégager, sans idée préconçue, les traits pertinents des objets-entités décrits par leurs critères.

Un ensemble de données aussi complet que possible est donc soumis à T'Analyse des Données" qui, d'un point de vue strictement mathématique, peut être regardée comme une analyse puisque, à partir de cet ensemble, le travail va consister à sortir quelques éléments, quelques expressions condensant au mieux l'information pour en dégager les propriétés principales. Il y a ainsi apparemment un "choix" comparable en premier abord à celui qui a été effectué au cours de l'acquisition des données écologiques où les études portent, parmi la multitude des caractéristiques possibles, sur quelques unes d'entre elles.

Mais l'analogie avec la démarche analytique des sciences exactes s'arrête ici car T'analyse" des données tend à synthétiser les données acquises et tient compte concrètement de celles-ci dans leur ensemble, tandis que l'analyse vraie sélectionne les caractéristiques retenues à la suite de choix qui écartent les autres caractéristiques. < < Cette terminologie peut paraître malheureuse, puisqu'il s'agit en fin de compte de désigner une synthèse>> (DIDAY et LEBART, 1977). Elle est effectivement dans l'ensemble des démarches scientifiques, comme d'autres "analyses mathématiques", une démarche vers la synthèse et serait plus justement (comme les autres "analyses" des mathématiciens) nommée étude (fig. 6-5).

Du point de vue de l'écologie, ce traitement mathématique résume, c'est-à-dire condense, l'information de l'objet d'étude initialement brisée par le choix de caractéristiques initiales (les DICs). Il s'agit d'une synthèse de ces données (même si elle n'est que partielle) par leur exploitation rationnelle qui extrait l'essentiel d'un ensemble de données.

Rappelons que la comparaison typologique est avec la systémique, l'un des deux Processus Répétitifs d'Accroissement des Connaissances (p. 357). Elle permet de comparer "de l'extérieur" les objets écologiques à partir des DICs qu'ils ont fournies. Cette comparaison étant effectuée subjectivement ou par le calcul de distances entre objets grâce aux statistiques descriptives, on peut définir des classes d'objets soit subjectivement autour d'un objet-type soit par taxinomie automatique en choisissant une métrique de distance et des distances critiques bornant les classes (ou un nombre de classes). L'attribution *a priori* d'un objet à une classe est un classement ; l'établissement, à partir des propriétés des objets, de classes est une classification. Un classement peut s'appuyer sur une précédente classification mais surtout les classifications peuvent servir à guider de nouvelles acquisitions de DICs pour améliorer ces classifications. Il s'agit bien d'un Processus d'Accroissement Répétitif des Connaissances permettant la comparaison et la typologie par classification de classes ordonnées (ordination) en hiérarchie cumulaire (fig. 6-4, p. 359).

Les ensembles de données issues du champ écologique étant multidimensionnelles (— "complexes"), il ne faut pas faire une partition *a priori* (p. 355). Il faut :

- 1) une étude multidimensionnelle sur données exhaustives (= assemblage exhaustif),
- 2) que les données, ne devant pas être sélectionnées (= exhaustives), puissent être à la fois qualitatives, quantitatives et floues (p. 367),
- 3) que les informations prises en compte pour une typologie du Champ écologique soient les données initialement sous forme de DICs, avec un minimum d'hypothèses liées à la lablation,

4) qu'il ne soit pas nécessaire que les variables s'ajustent sur un modèle préétabli (telle une distribution normale, linéaire, ...) : il faut que toute donnée sans exclusion puisse être traitée,

5) que la méthode rende accessible au chercheur les traits généraux pertinents, puis successivement des traits de plus en plus particuliers : elle doit procéder du général au particulier.

Actuellement seule l'étude synthétique par l'Analyse Factorielle des Correspondances (= AFC) répond à ces exigences à peu près parfaitement. A peu près parfaitement en ce sens que les données quantitatives doivent être alloties (voir ci-dessous). Les données floues (p. 348) ne présentent pas de difficultés spécifiques car elles ne nécessitent pas d'être numérisées pour ce traitement ; les indications floues peuvent être conservées à la manière des variables qualitatives.

6.4.2. Comparaisons multivariées

1. Avantage et inconvénient de l'AFC

L'AFC exige une présentation des données en tableaux disjonctifs complets (transformables en tableaux de contingence). Il suffit de rendre les données "qualitatives" pour pratiquer l'Analyse Factorielle des Correspondances (= AFC). Cette mise en forme conduit à allotir des données quantitatives en lots qualitatifs (p. 363). A ce stade, on perd de l'information. Mais cette perte d'information est largement compensée par le fait essentiel que l'écologue n'a plus à analyser séparément les critères quantitatifs, qualitatifs et flous. Tous les critères des entités peuvent être pris en compte simultanément.

Autre avantage, on peut prendre en compte des données ayant des liaisons non linéaires entre variables, à la différence de l'Analyse en Composantes Principales (ACP), qui repose sur les coefficients de corrélation basés sur la relation linéaire entre variables et où une corrélation quasi nulle ne garantit pas l'indépendance. En allotissant une caractéristique quantitative en une série de critères qualitatifs (lots) on considère toutes les combinaisons, linéaires ou non, **<<on envisage en fait toute une gamine de fonctions autres que linéaires transformant un caractère numérique en un autre caractère numérique. On conçoit alors que l'étude des relations linéaires entre des fonctions non linéaires des caractères revient à celle des relations non linéaires entre caractères>> (BOUROCHE et SOPOROTA, 1983) (ici, caractère = critère).**

Ceci ne signifie pas que l'on allotit une caractéristique quantitative en critères qualitatifs de façon quelconque. En pratique, il y a intérêt à faire une observation préalable des données quantitatives (p. 364) ... qui peuvent avoir une distribution difficilement descriptible par une fonction mathématique classique et à s'efforcer de borner en lots regroupant suffisamment d'indicateurs mais reflétant les traits majeurs de la distribution observée graphiquement. Pour les grands ensembles, il existe des programmes d'aide qui divisent automatiquement en lots à effectif, ou à amplitude, constant.

Mais les analyses multidimensionnelles obligent à une certaine pratique. **< Si les outils d'observation liés à l'utilisation de l'ordinateur sont disponibles, ils ne sont pas forcément bien utilisés : pour qu'ils le soient correctement, il importe de bien connaître l'instrument, de l'avoir en quelque sorte "étalonné" sur des données connues pour voir comment il traduit la réalité en langage factoriel. Ayant acquis expérience et confiance dans l'instrument, l'observateur acceptera ensuite de se faire remettre en cause par l'observation qu'il ne se sentira plus le droit de nier >> (C1BOIS, 1986).**

2. Démarche générale de l'AFC

L'objet de l'AFC est essentiellement d'extraire d'une matrice (ou tableau initial : T_i) l'information opérationnelle, c'est-à-dire utile (p. 90).

Pour cela le programme calcule un tableau d'indépendance (T_o) de données respectant la fréquence totale de chaque critère (colonne) au prorata du nombre d'entités (lignes). Cet effectif théorique est proportionnel aux valeurs totales de chaque ligne et de chaque colonne. De cette façon ce tableau d'ordre zéro (T_o) représente ce que donnerait le hasard, c'est-à-dire la non liaison entre les ensembles-lignes (entités) et les ensembles-colonnes (critères) avec les seules contraintes du respect des marges (sommées colonnes et lignes) calculées à partir du tableau-matrice initial (T_i). Ces valeurs ne dépendent que des sommes lignes et colonnes de la matrice : ce sont des valeurs "banalisées".

Par rapport à ce tableau d'indépendance T_o , les données réelles de T_i ont un écart qui mesure l'information, c'est-à-dire les données qui nous apportent le plus d'information utile par rapport au tableau banalisé T_o . Ces écarts peuvent être présentés dans un tableau des écarts R_i établi par différences $T_i - T_o$ de toutes les valeurs homologues. Ces écarts sont d'autant plus importants que la donnée diffère proportionnellement (en plus ou moins) par rapport à la valeur homologue T_o (+ 100 par rapport à 200 est plus important que + 100 par rapport à 1 500). C'est cette différence pondérée (ou contribution au Khi-carré) qui est prise en compte en AFC pour mesurer l'information utile (exprimée en % des écarts pondérés observés dans l'ensemble du tableau, donc en % de l'information opérationnelle apportée).

Ce tableau des écarts R_i (de l'information effective extraite de la matrice T_i) est ensuite traité par un algorithme fournissant des "coordonnées factorielles" F_i et G_i associées respectivement aux ensembles-lignes et ensembles-colonnes. Ces coordonnées factorielles (au nombre de $n + p$) sont calculées de façon à donner la meilleure approximation de R_j (qui comporte $n \times p$ valeurs) par une formule multiplicative $R_j(i,j) \approx k F_j(i) \times G_j(j)$ ou $k = 1/V^2$ est la valeur propre du tableau T_j , voir ci-dessous). Appelons T_j le tableau obtenu par les produit $F_j \times G_j$ ci-dessus.

Ce tableau T_j extrait de R_o est le plus proche possible de R_j (selon le khi-carré). T_j est la meilleure approximation des écarts à l'indépendance (= de l'information utile) de T_i présents dans R_j ; T_j , première approximation de cette information, est appelé premier facteur. Ces valeurs lignes T_j et colonnes T_j sont appelées vecteurs propres de R_i (ils peuvent être positifs ou négatifs). Ces vecteurs propres résument le tableau T_j selon le premier axe factoriel. Le khi-carré du tableau T_j rapporté au khi-carré du tableau T_i d'origine est appelé phi-carré ou valeur propre du tableau T_j exprimé en pourcentage du khi-carré de T_i . Le khi-carré de T_j donne le pourcentage de l'information résumée par le premier axe factoriel (ou facteur).

Dans la terminologie de BENZECRI (1973) un axe factoriel est un être géométrique (= l'axe sur lequel on projette) matérialisé par un vecteur. Les facteurs sont les fonctions mathématiques qui permettent d'obtenir les coordonnées factorielles des lignes et des colonnes, c'est-à-dire la projection des points sur les axes factoriels.

Toutefois le tableau T_j ne résume pas totalement R_j ; la différence $T_j - R_j$ engendre un nouveau tableau R_v de l'information résiduelle non résumée par le premier axe factoriel. Ce reste non résumé par T_j sera à son tour soumis à l'algorithme qui tendra à résumer son information par un tableau T_2 qui fournira les valeurs du deuxième facteur (vecteurs + T_o) et éventuellement un reste R_j non résumé et à son tour traité par l'algorithme.

Cette opération pouvant être répétée jusqu'à épuisement de l'information initiale de T_i . En pratique seuls les premiers axes sont calculés en raison de leur valeur informative.

Ainsi, la matrice est résumée par un nombre réduit d'axes factoriels d'importance décroissante (que nous appelons plus simplement axes et non facteurs à la fois pour simplifier et pour éviter la confusion avec les facteurs écologiques). Les

coordonnées vectorielles (lignes ou colonnes) sont centrées, indépendantes et ont une moyenne réciproque entre colonnes et lignes. Chaque entité et critère sont repérés par rapport à chaque axe par ses coordonnées (négatives ou positives) qui contribuent au khi-carré du tableau (axe) total en cause : ce sera sa contribution relative à l'axe.

Les nuages de points représentant les variables (critères et entités) se référeront tous à un centre axe par axe. Ce centre, étant commun à tous les axes, est le centre du nuage de points de l'hyperespace des n axes extraits de T_i ; il est aussi appelé barycentre.

La valeur d'un khi-carré d'une ligne (ou colonne) mesure également pour chaque variable la part relative de l'apport, via l'axe factoriel, à l'information totale apportée par cette variable du tableau initial T_i . Ceci sera exprimé sous forme d'une contribution relative (en pour mille) de la variable à la ligne ou la colonne de T_i . On parle aussi de contribution de la variable à l'axe factoriel (en pour mille également).

En définitive, à chaque étape de l'analyse factorielle, un axe factoriel résume un certain pourcentage de l'information utile : la valeur propre rapportée à la somme des valeurs propres des axes permet de chiffrer ce pourcentage. Cet axe permet de repérer les variables par des coordonnées d'autant plus remarquables qu'elles sont importantes en valeur absolue et contribuent à l'axe.

Considérons les variables, en se situant par les coordonnées factorielles des colonnes et lignes calculées pour chaque axe ; les variables allant dans le même sens (négatif ou positif, sur un axe) et ayant des coordonnées proches se comportent de la même façon et ont un écart identique à l'indépendance initiale résumable par cet axe.

Le poids réel de chaque variable dans la définition de l'axe (= de cette part d'information utile résumée par le tableau correspondant) est traduit par leur contribution à l'axe (= au facteur), notée CTR. Réciproquement, la part de leur écart à l'indépendance totale résumée par cet axe est indiqué par la contribution relative à la colonne ou à la ligne initiale de T_i , noté COR (c'est la contribution relative d'un facteur au carré de la distance d'un point au centre de l'axe). Ces valeurs sont précieuses car elles permettent à la fois de constater des regroupements, des "parentés entre variables" et d'apprécier la signification, le poids de chacune des variables dans l'information utile totale. C'est d'abord en regardant ces tableaux de valeurs (COR et CTR) que l'écologue pourra utiliser les résultats d'une AFC.

En résumant sur ces axes des faits écologiques où certaines variables ont une importante contribution, il est possible de reconstruire en partie ce que l'analyse des caractéristiques avait dû séparer lors de l'acquisition des données. L'axe factoriel est une synthèse dont l'interprétation peut parfois être rapprochée d'observations intuitives globales, telle la "fertilité" dans la figure 6-8.

Les graphiques qui accompagnent les analyses factorielles tentent une synthèse supplémentaire en présentant sur un plan la répartition des entités ou/et critères par rapport à deux axes toujours orthogonaux au barycentre. Un graphique ainsi constitué résume l'information des deux axes pris en compte (souvent axes 1 et 2, 1 et 3, 1 et 4...). La proximité de variables sur de tels graphiques est toutefois parfois trompeuse (sauf dans le cas où les deux premiers axes résument une valeur proche de 100 % de l'information) ; deux variables proches dans le plan des axes 1+2 peuvent être totalement opposées par l'axe 5... ou tout autre. La représentation devrait pouvoir être faite dans un hyperespace à n dimensions (ou n = nombre d'axes).

Cela ne retire pas l'intérêt de l'observation des tendances générales et globales observables dans un nuage de variables observées comme des points dans un des plans de l'hyperespace défini par les multiples combinaisons des axes factoriels. Toutefois, toute interprétation particulière de liaison devra être faite en référence avec le tableau des coordonnées et contributions relatives à l'ensemble des axes et non pas à partir des figures privilégiant seulement deux axes.

On peut même en attribuant une dimension à la contribution relative à l'axe (CTR) donner par une surface rectangulaire de chaque indicateur une représentation géométrique de la contribution de l'indicateur aux deux axes.

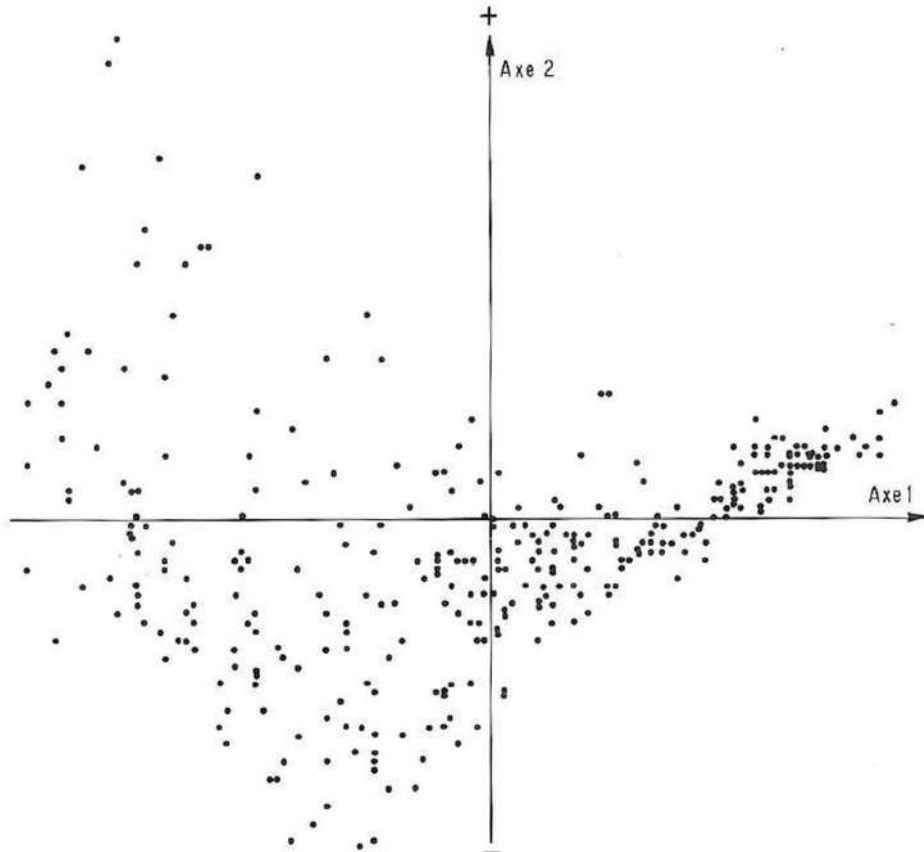


Figure 6-8 - Une AFC, 199 entités x 322 critères sur un territoire. Synthèse de la description de 199 points (p. 279, 288) de Belgique décrits par 322 critères (phytologiques, zoologiques, pédologiques, topographiques). Le premier axe traduit intuitivement le concept global de "fertilité" tandis que le second oppose l'hydromorphie (-) à la sécheresse relative.

Les logiciels permettent également de n'utiliser, à partir d'une matrice, que certaines variables (critères, entités) comme variables actives dans l'établissement de l'AFC puis de situer des variables passives, dites supplémentaires, dans l'hyperespace de l'AFC. Ces dernières variables sont "expliquées" par les premières.

L'AFC, multivariée, permet de révéler la proximité entre deux variables de la matrice mais non de l'apprécier. Le test de "khi-carré" permet ultérieurement d'affiner l'exploitation des résultats en précisant l'importance du lien entre une entité et un critère (e.g. Gkanval, 1988).

NOM	ABREVIATION	CRITERES	PRINCIPAUX USAGES
Analyse en Composantes Principales	ACP	Quantitatifs	Analyse par combinaisons linéaires de la proximité d'entités à partir de critères quantitatifs
Analyse Factorielle des Correspondances	A FC	Qualitatifs, flous, quantitatifs allotis	Analyse des proximités par combinaisons, y compris non linéaires, entre variables (critères <i>us</i> entités, entités <i>vs</i> critères)
Analyse Canonique		Quantitatifs	Grande importance théorique, peu utilisée directement
Analyses en Composantes Principales sur Variables Instrumentales	ACP-VI	Quantitatifs	Calcul des corrélations entre axes factoriels de deux ACP ayant mêmes entités mais séries de critères distincts
Analyse Canonique des Correspondances	ACC (AFC-VI)	Qualitatifs, flous, quantitatifs allotis	Calcul des corrélations entre axes factoriels de deux études multidimensionnelles ayant mêmes entités mais séries de critères distincts
Analyse Factorielle Discriminante	AFD	Quantitatifs	Recherches d'axes factoriels, discriminants séparant au mieux des entités décrites par des critères quantitatifs
Analyse Discriminante Décisionnelle	ADD	Quantitatifs	Attribution sur caractères quantitatifs de l'appartenance d'une entité à une des catégories pré-établies (aide à la décision d'attribution)
Classifications variées	c/p. 374	Qualitatifs, flous, quantitatifs	Recherches de classes regroupant des entités. Nombreuses modalités dépendant de choix d'experts (métrique, niveau hiérarchique). Constitution de hiérarchies cumulables

Tableau 6-1 - Quelques méthodes d'analyses multivariées des données.

3. Les analyses multivariées

Du point de vue de la pratique écologique, l'AFC constitue l'outil le plus général de l'abord des données écologiques en raison de sa flexibilité, bien que d'un point de vue statistique elle peut être regardée comme un cas particulier de l'analyse canonique (CIBOIS, 1983).

D'autres méthodes d'analyse multivariées des données sont mieux adaptées à certains objectifs, soit numériques (ACP), soit décisionnelles (AFD), soit combinatoires, par la recherche de corrélations entre matrices de données (RAO, 1980) par ACP-VI (Sabatier, 1983) et par l'Analyse Canonique des Correspondances (ACC) (fig. 6-9) (tableau 6-1).

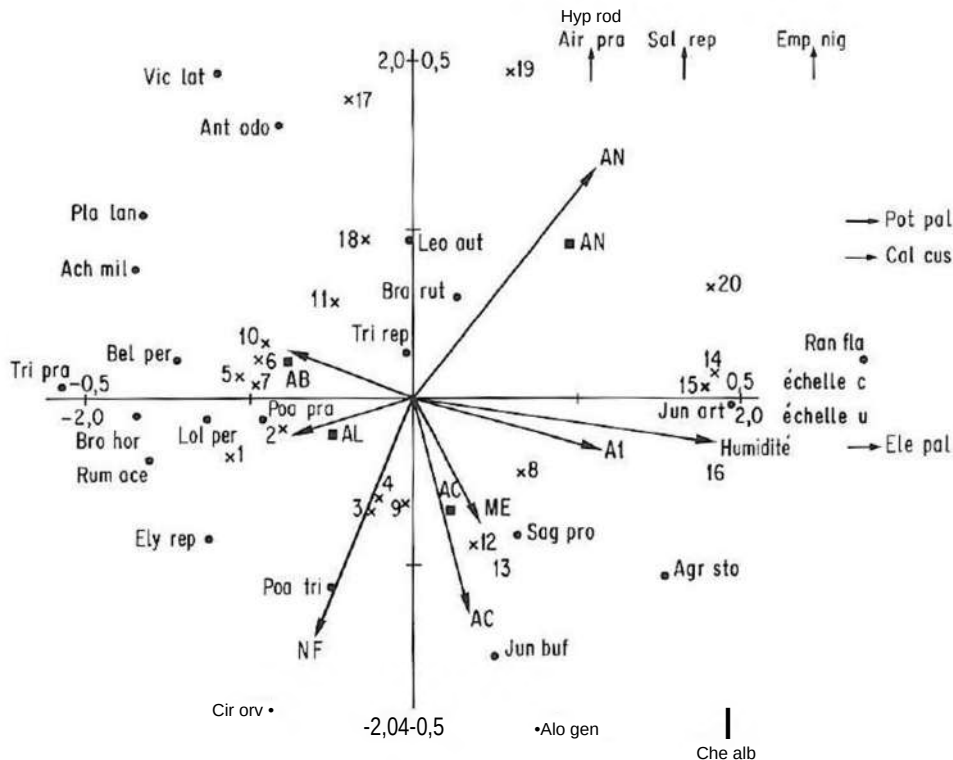


Figure 6-9 - Analyse Canonique des Correspondances des données relatives à des herbages de dunes. La projection des variables de milieu, selon l'échelle c, est symbolisée par des flèches tandis que la projection des espèces végétales et des sites se rapporte, à l'échelle u. Les carrés situent les types de gestion par leur centroïde vis-à-vis des herbages correspondants. AP, AC, AL sont respectivement des agricultures biologiques, conventionnelles et de loisir, AN des aménagements de conservation naturelle ; A_j = épaisseur de l'horizon A_j ; ME = mode d'exploitation ; les numéros sont ceux des sites ; les autres abréviations sont celles de noms de plantes (d'après TER BRAAK, 1987).

6.4.3. Typologie et classification

1. Problématique

Comme développée au paragraphe 6.3.2., et rappelée en 6.4.1., la comparaison des objets écologiques constitue, devant une information totalement nouvelle, une première étape permettant de situer ces objets les uns par rapport aux autres (p. 368) selon diverses métriques (axes factoriels) depuis les données les plus générales vers les plus particulières. Toutefois ces objets peuvent être classés : certains seront regroupés dans une classe et simultanément séparés des autres. Cela revient à rechercher le moyen de classer les objets au mieux ou subjectivement, par AFD ou, sans idées préconçues, par des techniques de taxinomie numérique. Les objets sont alors considérés comme suffisamment identiques entre eux pour appartenir à une classe ou/et comme assez proches d'un objet-type ou comme ayant les critères typiques de la classe. Toutes les classifications, aux hiérarchies cumulables, visent à regrouper, à simplifier, à synthétiser en considérant des objets comme assez semblables pour être confondus comme identiques.

Cette classification typologique, s'inscrivant dans le Processus Répétitif d'Accroissement des Connaissances de comparaison typologique, hérite souvent de Classifications antérieures ayant défini une typologie, ou encore d'une modalité expérimentale imposant un classement en classes pré-établies, comme en ADD.

L'AFC permet souvent de repérer empiriquement des groupes d'entités et de reconnaître les critères pertinents qui y sont associés. Elle permet surtout en ordonnant les axes de reconnaître la structure de l'ensemble des données considéré et de situer mutuellement les entités par rapport aux critères et de reconnaître le degré de proximité entre entités, entre critères et entre entités et critères. Ceci invite à tenter de classer ces divers groupes qui peuvent être eux-mêmes subdivisés en sous-groupes (= hiérarchie cumulée, p. 94). En tout cas, l'information bien identifiée est synthétisée par rapport à des coordonnées euclidiennes révélant des proximités. C'est avant tout un outil d'appréciation des similitudes relatives. Cela laisse à l'expert le soin de décider si les critères ou/et entités étudiés sont assez semblables (abusivement qualifiées d'homogènes !) ou assez distincts pour constituer des groupes "séparés".

< Le gros avantage que nous voyons dans la méthode d'analyse factorielle est qu'elle donne directement la figure représentative de l'ensemble à classer et ce avec une totale objectivité évidemment.

... EL à propos d'objectivité, nous ne saurions trop louer la méthode d'analyse factorielle qui présente à ce point de vue toutes les garanties que l'on est en droit d'exiger... >> (ROUX et ROUX, 1967).

2. Classes, continuums et caractéristiques

Un effort considérable de classement a par ailleurs été entrepris par diverses disciplines, à différentes époques et par des méthodes variées, que ce soit la biologie avec son énorme outil taxonomique, la pédologie avec les classements des sols, la phytosociologie ordonnant les végétaux groupés en associations, la typologie de climats, flores ou faunes, etc. Des classements, plus ou moins hiérarchisés, ont été proposés, discutés, remis en cause, etc. Les caractéristiques écologiques appartiennent à des ensembles faisant l'objet de tels classements.

Dans tous les cas, des "coupures" sont introduites de façon généralement arbitraire et pragmatique. Les exceptions où les coupures sont totalement justifiées sont d'ailleurs souvent plus apparentes que réelles. Nous avons vu (p. 254) que le concept d'espèces, seul fondé biologiquement, s'il est théoriquement "pur", n'est pratiquement maîtrisé que de façon exceptionnelle et, en pratique, ne constitue pas nécessairement la "coupure" idéale car l'on a souvent intérêt à tenir compte des caractéristiques liées aux populations, sous-espèces, ... L'individu lui-même, morphologiquement bien déterminé chez les animaux et plus difficilement dans les

autres cas, constitue une approximation fonctionnelle grossière par rapport au métabolisme (p. 82).

Hormis quelques rares exceptions (rupture dans le paysage, individus bien différenciés, espèces réellement connues comme telles) la plupart des classes n'est pas définie sans ambiguïté et d'innombrables discussions portent sur la qualité des classes (au sens large) adoptées et des principes de hiérarchisation (p. 94, 250, 376) ordonnant ces classes.

Comme le disait le grand taxonomiste GRANDJEAN en 1954 << (L'évolution) n'a aucune raison de faciliter notre travail de classement.> > Ce qui est vrai au sujet de taxons, l'est encore plus au sujet, d'entités écologiques en général : on peut dire que la nature n'a aucune raison de faciliter notre classement. Les mouvements majeurs (p. 119), allant des vents avec leurs éléments solides et liquides, aux courants marins et à plus long terme aux mouvements érosifs et au coulissement des plaques tectoniques, homogénéisent en assurant un brassage perpétuel d'éléments et de conditions d'ambiance. Ces mouvements n'excluent évidemment pas des tendances : il fait plus froid aux pôles qu'à l'équateur, mais entre les pôles et l'équateur, il y a un continuum thermique moyen perturbé par de nombreux phénomènes physiques.

Dans un tel contexte, il y a une infinité de variations des roches -aujourd'hui d'origine tant tectonique, que biogéophysique (tels les dépôts calcaires du Jurassique) subissant des déformations, orientant des expositions, des érosions, des formations de sols, des réserves d'éléments chimiques, infiniment variés à toutes les échelles de l'espace-temps. Le brassage des espèces (leur mobilité) et la variation génétique infraspécifique à ces différentes échelles, sont permanents mais toutefois insuffisants pour créer dans les mêmes conditions physicochimiques la même biocénose : l'hétérogénéité est non seulement physicochimique par la nature de notre planète mais aussi par son histoire (= innés des systèmes).

L'écologue est donc confronté pour tout objet d'étude à une double démarche contradictoire en apparence : il doit distinguer des objets et souvent constater que ces distinctions s'inscrivent dans des continuums à hétérogénéités variables (p. 38)

En considérant plus globalement un ensemble de caractéristiques biophysicochimiques d'un site, leur continuité dans l'espace est avant tout fonction de la finesse de l'analyse adoptée. Que l'on mesure le pH d'un sol et l'on trouve toujours une différence à une distance encore plus proche en affinant aux unités inférieures, de même chaque individu de chaque population est probablement quelque peu différent du voisin sinon génotypiquement du moins phénotypiquement. Dans toute la mesure du possible, les caractéristiques étudiées devront être retenues parmi des classes préalablement bien assises, même si leur classement relatif est douteux : ce dernier point est accessoire car il pourra être réinterprété *a posteriori*. Les classes résultent du niveau d'observation (p. 34) retenu dans l'analyse, mais ne doivent plus préjuger de la classification, elle-même productrice de classes mais de niveau hiérarchique supérieur à celles fournissant les DICs.

L'adoption de classes a donc avant tout une fonction d'ordre à un niveau de perception donné. Ce choix a constitué un problème crucial pour toute expression spatiale de l'hétérogénéité des milieux (sur des cartes ou schémas) car la finesse de la classe choisie était liée à l'échelle de la carte. L'information exprimable par une carte, ou un diagramme, est limitée par la lisibilité du document... et parfois son extrême technicité. Ce problème de mise à disposition de l'information auprès des utilisateurs doit être abordé au niveau de l'interprétation (p. 426) et de l'écologie appliquée (p. 477).

Aujourd'hui, il y a lieu de dissocier totalement les classes des problèmes éditoriaux, techniquement indépendants et faciles à résoudre par infographie. En pratique, pour le même effort d'identification aux classes, l'écologue a toujours intérêt de choisir l'unité efficacement accessible la plus fine car l'on ne peut préjuger

de l'usage des DICs (p. 297) et notamment de leur future réorganisation en classifications différentes dans le cadre du PRAC de comparaison typologique.

3. Taxinomie : Classification et hiérarchie

Les entités ou/et critères (= variables) d'une matrice peuvent être classés à partir de leurs propriétés, sans idée préconçue sur la classification en cause.

C'est l'altitude normale devant un nouvel ensemble de données. Les partitions qui peuvent résulter des propriétés de cet ensemble doivent découler de lui et non l'inverse (p. 356). Nous verrons toutefois plus loin que l'on peut dans certains cas particuliers avoir de solides raisons d'imposer un classement.

Remarquons que très souvent la classification est liée à la hiérarchisation en considérant un sous-ensemble classé comme un nouvel ensemble dans lequel on recherche des sous-ensembles d'ordre inférieur. On obtient ainsi une hiérarchie cumulaire. Parfois la classification ne vise qu'à faire une seule partition, ce qui est néanmoins une hiérarchie cumulaire (l'ensemble et ses 2 parties).

ROUX, 1985, discute des diverses classifications et surtout indique l'usage pratique d'algorithmes utilisables. Les classifications dépendent au départ de la mesure d'une distance entre entités. Le rôle des variables en entités et critères peut être si nécessaire permuté, on obtient alors une grande diversité de manières d'évaluer ces distances et aucune ne peut être retenue comme généralement satisfaisante. Il y a donc lieu d'utiliser des distances relativement classiques (sauf cas très justifié) et **<<étant donné la faiblesse des bases théoriques de tous ces algorithmes usuels, il serait imprudent de se fier totalement aux résultats ainsi obtenus. C'est pourquoi nous recommandons vivement à l'utilisateur de toujours confronter ses résultats à ceux d'une analyse factorielle (FOUCART, 1982)>>** (ROUX, 1985). Cette appréciation est normale car la classification n'est pas totalement descriptive : elle fait intervenir un jugement d'expert qui tranche subjectivement dans les continuums hétérogènes pour définir au mieux les classes par rapport à notre perception des objets écologiques en cause : il ne peut y avoir une base théorique purement numérique car il y a décision (p. 384).

D'une façon générale, les données écologiques sont mixtes. Pour celles-ci et pour les données qualitatives et floues, l'AFC s'impose par ailleurs comme préalable car elle permet d'utiliser pour les classifications, les distances vectorielles sur les principaux axes (pour les données exclusivement quantitatives l'Analyse en Composante Principale = ACP peut être employée aux réserves de "linéarités" près, p. 368). L'AFC fournit de nouvelles variables non corrélées, de distance euclidienne, de volume réduit (aux axes factoriels les plus informatifs), stables (en ce sens que les petites erreurs des données initiales sont généralement "tamponnées" par l'approche multivariée) et portant sur des données initiales qui peuvent être très hétérogènes. Comme déjà indiqué, l'AFC devra *in fine* étayer le contrôle de l'interprétation des classifications.

Les calculs des distances entre entités soumises à classification étant effectués on peut procéder par

a) construction hiérarchique ascendante : l'algorithme rapprochant les objets-entités à distance très proche puis ces ensembles d'objets entre eux de sorte que les distances reliant ces objets sont hiérarchisées depuis les plus proches jusqu'aux plus lointains, la hauteur des noeuds étant égale à la distance séparant les objets (ou groupes d'objets),

b) construction hiérarchique descendante : l'algorithme procède en sens inverse. Il divise d'abord l'ensemble initial total en deux puis, par dichotomie, les sous-ensembles ainsi formés en nouvelles classes, en choisissant d'abord à chaque étape la classe (le sous-ensemble) ayant la dispersion des objets (distances entre eux) maximale (FAGES, 1978)

c) construction hiérarchique du moment d'ordre deux : il s'agit d'une construction hiérarchique ascendante qui n'est pas basée sur les distances entre entités mais sur l'augmentation de la dispersion des entités. (On regroupe successivement les sous-ensembles en choisissant d'abord les deux sous-ensembles qui regroupés présentent la dispersion la plus faible par rapport à toute autre combinaison de regroupement... et ainsi de suite). La mesure de la dispersion se fait par le calcul du moment d'ordre deux qui est la somme, pour tous les critères et toutes les entités, des carrés des écarts à la moyenne, éventuellement pondérée par une masse que l'on a attribué à des entités,

d) agrégation autour de centres mobiles : il s'agit d'une classification où l'on choisit *a priori* de faire une partition en N classes (N étant choisi) en se fondant sur la dispersion de moment d'ordre deux. D'emploi délicat, elle exige une pratique de certaines supputations discutées in ROUX (1985).

L'interprétation des classes obtenues et de leur hiérarchie peut s'effectuer par les variables qualitatives, floues et mixtes (devenues toutes qualitatives) :

a) la contribution de chaque critère, à chaque classe de la partition, permet de juger du rôle et du lien d'un critère aux objets regroupés dans la classe,

b) la contribution de chaque variable à l'écart entre deux classes permet de se faire une opinion sur l'importance de certains critères comme moyens de scinder, de caractériser les entités des classes,

c) pour les données quantitatives, un calcul direct de la "contribution des variables aux classes" et réciproquement de la "contribution des classes aux variables" est fourni par les algorithmes de classification.

4. Classement et classification

Le classement des entités revient à attribuer celles-ci à des classes pré-établies. Par exemple, en regroupant en Classes les objets ayant subi un traitement pesticide ou ne l'ayant pas subi. Ou encore ceux que l'on a attribué sur la base d'une classification antérieure à 6 classes différentes. Le but de l'Analyse Factorielle Décisionnelle est de déterminer les règles et les traits qui caractérisent ces classes pré-établies à partir des critères caractérisant les entités rangées d'après ce classement.

Ici le modèle de classement ne découle pas directement des faits mais d'un choix antérieur : le classement est imposé aux données. Toutefois, il ne s'agit pas d'une attribution *a priori*, comme dans l'allotement, mais d'une attribution *a posteriori* à partir d'une connaissance antérieure.

Notons que les classifications automatiques portent sur la matrice entités x critères et imposent une classification "tomique" (par coupure généralement dichotomique) propre aux hiérarchies cumulables.

1) Elles présentent les limites de l'information fournie, c'est-à-dire ne tiennent pas compte des informations externes connues de l'expert (mais dans le futur immédiat de plus en plus incorporables dans la matrice, p. 422, 425).

2) Elles dépendent de décisions d'expert (choix de la métrique, appréciations subjectives sur les distances).

3) Elles ne peuvent refléter les hiérarchies systémiques, la connexité systémique (p. 93) n'étant pas respectée.

Pour ces diverses raisons, la classification taxinomique ne saurait être confondue avec le classement - y compris taxinomique (p. 250).

11 est possible avec la gestion des DICs en BDR de restituer les DICs ayant servi à définir la classification typologique antérieure et de la confronter objectivement aux données issues des nouveaux objets à classer (par Analyse Factorielle Discriminante, par ACC depuis deux matrices, ...).

6.4.4. Redondances et optimisation du PRAC

1. Problématique

Le fait que l'on soit dans un Processus Répétitif d'Accroissement des Connaissances ne conduit pas qu'à une comparaison (p. 368) plus complète ou une typologie (p. 373) plus achevée, mais aussi au constat que certains critères découlent de caractéristiques ayant apporté peu d'information dans la comparaison des objets et que certains objets n'apportent que le constat de leur similitude mutuelle. Cette redondance entre caractéristiques et objets étudiés peut ne pas être souhaitée et notamment, en conditions classiques de moyens d'étude limités, peut servir à optimiser les moyens d'étude en réduisant ces redondances.

Le choix des critères, leur nombre pour décrire une entité, ainsi que le nombre d'observations nécessaires (nombre d'entités prises en compte) est une question générale qui est indépendante des objectifs particuliers des études. L'étude d'une portion du champ écologique peut par exemple être répétée un certain nombre de fois par prélèvement ponctuel où chaque point est caractérisé par de nombreuses caractéristiques qui, après tablation, donneront les critères, les points devenant les entités.

L'étude des redondances entre critères permet de réduire le nombre de caractéristiques ultérieurement étudiées pour le même gain d'information mais aussi de sélectionner objectivement les points où les études sont à approfondir tout en accroissant leur interpolabilité sur une base objective. Cette optimisation opérationnelle commande la crédibilité de l'écologie (p. 426, 477, 499, ...).

2. Redondance des critères et transdisciplinarité

Dans la position générale où l'on ne cherche pas à opposer telle série d'entités à telle autre par une partition *a priori*, on peut se poser la question du nombre suffisant des critères écologiques finalement étudiés tenu compte de leur redondance pour caractériser chaque entité. Rappelons que la présence d'un arbre (ou d'un ver de terre) indique d'une certaine façon un climat et un type de sol compatibles et, réciproquement, un type de sol ou un climat n'autorisent pas n'importe quel être vivant. Ceci résulte du fait que tout critère résulte par tablation de caractéristiques et que ces caractéristiques sont elles-mêmes composants systémiques. Ce sont donc des éléments de systèmes écologiques réels (p. 88). Les composants systémiques n'étant pas indépendants, les caractéristiques et les critères ne le sont pas non plus (fig. 6-6, p. 363).

Cette propriété peut être mise à profit en soupçonnant que lorsque l'on a un nombre "suffisant" de critères ceux-ci caractérisent le système entier donc toutes ses caractéristiques même celles qui n'ont pas été mesurées.

En d'autres termes, un zoologiste faisant l'identification d'un individu ne regarde pas tous les caractères morphologiques, physiologiques, génétiques de l'individu mais seulement certains choisis pour leur commodité ; ceux qui se sont avérés suffisants pour attribuer cet individu à un taxon. Ainsi, il reconnaît à cet individu l'essentiel des caractéristiques connues et inconnues propres à une espèce (ou variété).

Pour les caractéristiques biophysicochimiques du champ écologique, le problème est identique si l'on travaille en intrapolation ponctuelle (= interaction effective des caractéristiques intrapolées au point de référence, p. 378), c'est-à-dire si l'on ne travaille pas sur des ensembles de caractéristiques relevées sans référence précise à leur situation dans le champ écologique. On est alors certain de travailler sur des critères reflétant *pro parte* des composants interactifs de systèmes écologiques réels.

Ceci permet l'étude d'un objet-point indépendamment de toute considération sur sa position "particulière" dans un continuum hétérogène (p. 38, 374).

Ceci évite les classements *a priori* (classification des associations végétales, des sols, des faciès géomorphologiques, ...) mais au contraire permet la prise en compte de l'apport de DICs quelconques, issues de disciplines scientifiques variées, contribuant à la connaissance biophysicochimique intégrée de ce point.

Les données devenant redondantes avec leur accroissement, le problème reste de savoir quand la caractérisation d'un point (— système intrapolé) peut être "arrêtée", ou encore quels sont, parmi les caractéristiques accessibles, celles qui sont les plus informatives et suffisamment informatives pour caractériser ce point-système sans travail ultérieur.

Il est clair que les caractéristiques écologiques variant dans l'espace-temps, cette recherche ne peut que se référer à une portion spatiotemporelle, au moins dans un premier temps. On pourra envisager de voir jusqu'où ces conclusions sont valides hors de cet espace-temps initial, par des comparaisons ultérieures.

Variables exemples	Nombre de caractéristiques	Lots totaux	Critères utilisés
<u>Topographie</u>	5	32	11
Longitude			
Latitude			

Pente			
<u>Pédologie</u>	65	137	78
Type de sol			
Texture			
Hydromorphie			

Rapport C/N			
<u>Taxons végétaux</u>	403	403	201
<i>Agropyrum obtusiusculum</i>			
<i>Agrostis alba</i>			

<i>Viola reiehenbachiana</i>			
<u>Taxons lombriciens</u>	39	40	32
<i>Nicodrilus caliginosus caliginosus</i>			
<i>Nicodrilus caliginosus tuberculatus</i>			

<i>Hormogaster gordioides</i>			
TOTAL	512	612	322

Tableau 6-2 - Variables écologiques décrivant 199 holocénoses belges de façon ponctuelle. Les 512 caractéristiques quantitatives initiales ont été alloties, les qualitatives étant traitées en deux modalités (présente ou absente) comme les lots. Parmi les critères, seuls ceux représentés au moins 3 fois ont été utilisés pour la matrice.

En étudiant la matrice "Belgique" (199 x 322 variables, fig. 6-8, p. 371, tableau 6-2) par le coefficient RV de Robert et ESCOüfrier (1976), il est possible de rechercher d'abord le critère le plus informatif d'une première AFC de cet ensemble de données mixtes traité sans partition *a priori*.

Ce premier critère "résume" 54,7 % de l'information opérationnelle. Après extraction de l'information liée à ce critère, une nouvelle AFC permet un calcul RV (indiquant un critère d'importance, en information opérationnelle, immédiatement décroissante, p. 90). C'est celui qui apporte le plus à cette nouvelle AFC est celui qui complète le mieux le premier critère dont l'information a déjà été éliminée. Après l'extraction de l'information liée au deuxième critère, le reste de l'information utile (= opérationnelle) sera extrait itérativement en tant qu'information complémentaire.

Le graphe, fig. 6-10, donne la saturation de l'information obtenue à partir d'un nombre croissant de critères complémentaires.

Quinze critères permettent de décrire 95 % de l'information décrite initialement par 322 critères ... Il faudra seulement 24 descripteurs pour atteindre 98,5 %, ce qui souligne le peu d'intérêt de l'acquisition des 198 critères restants.

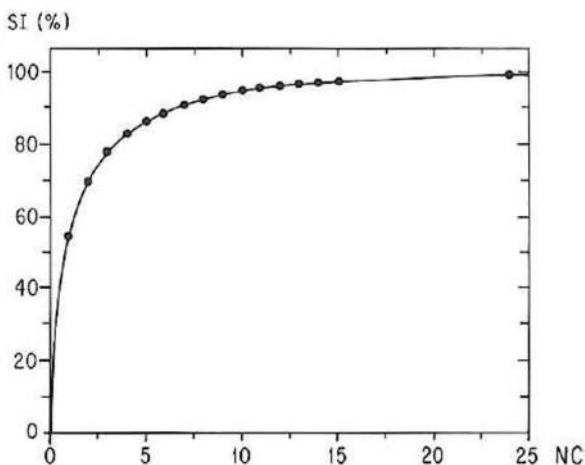


Figure 6-10 - Saturation de l'information acquise par l'étude (de 199 entités) de seulement 24 critères dans un espace de Belgique étudié depuis 322 critères. SI % - taux de saturation de l'information ; NC = nombre de critères mis en oeuvre à chaque Etape de l'Analyse : EA : voir tableau 6-3.

Je donne, tableau 6-3, la liste des 15 premiers critères qui, complétement, résument 95 % de l'information du tableau.

Il est à noter que la comparaison des tableaux 6-2 et 6-3 montre que l'information provient de sources variées mais que, par exemple, l'économie de l'échantillonnage des lombriciens pourrait être faite. Il est à remarquer que la variable n° 2 du tableau 6-3 est une observation interprétée subjectivement et synthétisée par les phytologues ayant assuré l'étude de la végétation, que les caractéristiques pédologiques "performantes" portent sur des traits très marqués, sol très sableux, charge du sol élevée et pH très bas, que la végétation est caractérisée à la fois par des herbacées, arbustes, arbres ou mousses.

La valeur informative des apports de telle ou telle "discipline" à la caractérisation morphofonctionnelle des systèmes-points peut être mesurée par ce type de recherche objective et non pas affirmée par les tenants de telle ou telle discipline, à partir d'une opinion partielle car partielle.

3. Redondance des entités et interpolabilité

Les recherches écologiques s'appuient sur l'étude d'un nombre de points ou de portions du champ écologique, nécessairement limité par rapport à l'écosphère. L'extension hors globalise des résultats d'une étude ne peut être assise que par inférence puis par une nouvelle obtention d'information. A l'inverse

l'approfondissement des connaissances, notamment systémiques, en un lieu ne peut pas être conduit partout : l'extrapolation des études lourdes et approfondies mériterait de s'asseoir sur des bases objectives. Cette demande est particulièrement critique dans les études globales, telle celle de l'étude internationale IGBP sur les changements terrestres, nécessitant l'interpolation du savoir local aux régions, aux continents et à l'écosphère.

E.A.	VARIABLE	NATURE	%ITCP	SATURATION
1	<i>Trifolium repens</i>	Plante herbacée	54,7	54,70
2	Humidité classe 2	Cl. empirique sur végétation	15,3	70,00
3	<i>Cirsium oleraceum</i>	Plante herbacée	7,96	77,96
4	<i>Potentilla fragariatum</i>	Plante herbacée	4,72	82,68
5	Classe sol sableux = lot 7	Sable > 760 %	3,13	85,81
6	<i>Sambucus racemosa</i>	Plante ligneuse	2,21	88,02
7	Charge du sol lot 4	Pierrosité	1,67	89,69
8	<i>Stellaria nemorum</i>	Plante	1,29	90,98
9	pH horizon supérieur lot 0	Acidité sol pH < 4	1,01	91,99
10	<i>Carex nigra</i>	Plante herbacée	0,89	92,82
11	<i>Centaurea pratensis</i>	Plante herbacée	0,69	93,51
12	<i>Eurhynchium stockesii</i>	Mousse	0,57	94,08
13	<i>Juncus sylvaticus</i>	Plante herbacée	0,49	94,57
14	<i>Alchimeria vulgaris</i>	Plante herbacée	0,41	94,98
15	<i>Quercus pedunculatus</i>	Plante arbre	0,36	95,34
***	***	***	***	***
24	Saturation très lente		0,14	98,50

Tableau 6-3 - Critères de l'étude "Belgique" (cf. tableau 6-2) apportant successivement de façon complémentaire le plus d'information sur la matrice utilisée par rapport à l'information totale apportée par 322 critères (= 100 %). E.A. = étapes de l'analyse. Variables fournissant la part d'information totale la plus importante à l'étape EA. % ITCP = pourcentage de l'information totale résumée par la variable la plus importante de l'étape EA complémentirement aux précédentes. Saturation = information cumulée de la matrice apportée par chaque variable complémentaire (cumul de % ITCP, cf. fig. 6-10).

L'écologie est confrontée à une multitude de besoins de connaissances, notamment sur des descriptions effectives de fonctionnement de systèmes partiels, voire d'écosystèmes, ou encore à des problèmes appliqués nombreux (mouvement de contaminants, effets de pratiques de gestion de l'espace, ...). Ces études particulières ont l'inconvénient majeur de focaliser nécessairement des moyens importants sur un cas qu'elles "expliquent" laissant à l'extrapolation des résultats la même subjectivité que celle qui a prévalu au choix de ce cas. Par exemple, le subjectif opportuniste du choix des lieux d'étude implique le subjectif des inférences ultérieures dans l'espace-temps.

Approfondir une recherche oblige à focaliser de nombreux moyens en un lieu - tel le projet Solling développé en Allemagne Fédérale (ELLENBERG, 1971). Comment et jusqu'où extrapoler de tels résultats ? Comment choisir ce(s) lieu(x) pour optimiser les futures extrapolations-interpolations depuis (entre) ce(s) lieu(x) ?

La sélection des stations d'étude pour des recherches longues se fait, pour des raisons de commodité, sur la base d'opinions empiriques subjectives, qui, parfois,

n'étant pas explicites, freinent la cohérence des recherches regroupant diverses spécialités.

La connaissance préalable des objets-points de l'espace permet de définir des familles de points de nature différente ou/et de rechercher sur ceux-ci, grâce au coefficient RV, la "station" la plus représentative de l'ensemble observé puis en ordre 2 la station qui résume le complément d'information non représenté par la première station et ainsi de suite.

Ainsi, il serait possible, à partir d'une matrice du type "Belgique" décrite ci-dessus, c'est-à-dire d'une étude typologique relativement légère, en inversant la matrice de sélectionner le lieu-holocénose le plus typique de la Belgique, puis celui qui compléterait le mieux l'information sur les écosystèmes de ce territoire, puis le lieu d'ordre 3 complémentaire, etc.

La sélection du lieu d'études le plus représentatif sur une telle base objective optimise le choix des localités et simultanément fournit le futur moyen d'interpoler les connaissances précises acquises sur un point, sur la base de la proximité morphofonctionnelle qui peut être appréciée par les axes de l'AFC, voire par une taxinomie numérique définissant ses classes à partir des points typiques retenus. 11 s'agirait d'une approche analogue à la définition morphofonctionnelle des catégories écologiques, page 245. On conçoit que l'interpolation d'études approfondies entre stations repérées dans l'hyperespace d'une AFC pourrait se substituer aux jugements subjectifs actuels. Les résultats pourraient ensuite être interpolés aux points. La globalyse des points serait optimisée, par ailleurs, par une sélection de caractéristiques efficaces guidant de futures acquisitions de données. L'importance opérationnelle de ce constat est considérable : elle permet d'optimiser le PRAC systémique par le PRAC comparaison typologique et de justifier ce dernier par l'explication apportée par le premier.

6.4.5. Présentation des connaissances

Nous avons déjà souligné l'impasse médiatique que constitue la forme traditionnelle de publication des résultats scientifiques (p. 305, 313). La marée blanche des documents, la perte d'information objective ou la technicité nécessaire pour comprendre, par exemple, certaines cartes multithématiques, s'efforçant de résumer une information émise vers des récepteurs trop divers, constituent des obstacles actuellement coutumiers. Remonter aux sources pour exercer une critique pertinente sur faits ou simplement réutiliser les données est généralement impossible.

La présentation des connaissances sous forme aussi synthétique que possible est une préoccupation normale : il s'agit de communiquer aux intéressés des documents concis. Mais la concision ne doit pas nuire à l'intelligibilité.

Pendant longtemps l'objectif de certaines disciplines était de transmettre aux autres disciplines ou aux décideurs l'état de leur connaissance sous forme de cartes, d'autres disciplines sous forme de rapports, parfois les deux associés (les notices des cartes). Ces documents s'efforçaient alors, pour justifier leur coût élevé d'édition, de donner un maximum d'information vers un public maximal. Ce public maximal toutefois était flou, mal identifié et n'avait pas toujours la technicité (ou la volonté d'acquérir la technicité) pour utiliser de tels documents. Alors que chaque décideur désire une réponse précise et simple à une demande spécifique unique, les cartes visaient à fournir des éléments pour d'éventuelles questions multiples. Enfin, les cartes "figées" vieillissaient en ne reflétant plus l'état des connaissances ni l'état de la partie des systèmes qu'elles décrivaient. Elles ont pourtant longtemps constitué le meilleur moyen synthétique de traduire les états des sols (cartes pédologiques), des faunes et flores (cartes chorologiques), voire polythématiques (cartes thématiques synthétiques-corrélatives, LONG, 1974, 1975). De tels documents étaient parfois utilisés pour des interprétations : <<... **la planification écologique. Cette approche a été développée aux Etats-Unis par Ian McHarg et son équipe de l'université de**

Pensylvanie... et introduite en France par M. Falque. Par superposition de cartes transparentes sur lesquelles sont représentés différents éléments de l'environnement, on identifie des zones homogènes. On évalue ensuite ces zones en fonction de leur aptitude à avoir tel ou tel type d'aménagement. > > (CHEMIN, 1976).

Nous avons vu que les données objectives peuvent devenir totalement accessibles (p. 317, 321) et que les connaissances des divers experts seront également décrites (p. 309) ; la communication immédiate sera télématique par des systèmes homme/machine (p. 433). Ceci n'exclut pas une présentation des connaissances sous une forme utilisable au cas par cas. Outre la possibilité de compléter ou commenter par un traitement de texte le travail, l'illustration résumant les données numériques et descriptives est aujourd'hui facilitée par des logiciels de graphiques. La représentation en plusieurs dimensions peut inclure une étape ultime d'interprétation de l'utilisateur/éditeur, notamment en choisissant des portées d'interpolation dans les systèmes graphiques (krigeage sur variables régionalisées, par exemple) dont seuls les éléments nécessaires seront présentés pour un public précis (à une ou n personnes). Les logiciels d'infographie créent l'aisance de ces présentations des connaissances et permettent une communication flexible entre écologues et, à la demande, auprès des acteurs socio-économiques.

La situation a beaucoup évolué et il n'est plus nécessaire de reporter l'interprétation après une pré-interprétation cartographique indépendante. L'exploitation des Bases de Données Relationnelles puis l'interprétation doivent être associées à des représentations spécifiques et concises vis-à-vis de chaque demande. L'infographie automatique en 2, 3 ou 4 dimensions peut être ainsi facilement mise en œuvre ainsi que beaucoup de moyens de présentations graphiques. C'est avec *Yeh et al.* (1986) associant dans un même logiciel l'interprétation et l'infographie, dans un projet de développement d'informatique intégré pour des études environnementales (p. 463).

Des Systèmes d'information Géographiques (SIG) mêlent des relevés objectifs de DICs, spatiotemporellement situées, à des DSEs issues d'interprétations antérieures, notamment déterminant des limites empiriques relatives à des unités de végétation, à des types de sols ou à des aires multicritères (par exemple : données sur les unités de paysage, les caractéristiques topographiques, les usages parcellaires, SI'ANDAU, 1989). Ces approches mêlant des interprétations d'expert subjectives, sur l'"homogénéité" des unités notamment, des DSEs pré-interprétées et des DICs objectives répondent souvent à des préoccupations appliquées immédiates, mais devraient devenir de plus en plus explicites (par couplage avec un Système-Expert décrivant les modalités de choix par exemple).

6.4.6. Des études multivariées aux analyses paucidimensionnelles

Les différentes méthodes d'analyses multivariées peuvent être souvent employées conjointement pour étudier les propriétés des systèmes écologiques perçus par la globalyse ; chacune tendra à mettre en évidence, dans le contexte des autres variables, l'importance de certaines de ces variables.

Celles-ci peuvent alors être jugées comme particulièrement pertinentes pour faire l'objet d'une étude isolée, pauci-dimensionnelle. Dans le cas de l'usage de l'ACP (fondée sur des corrélations linéaires multiples) il est possible de s'appuyer sur la présentation des projections des variables vis-à-vis du cercle de corrélation et des axes (édités deux à deux en plans factoriels). Cela permet de sélectionner les variables hautement corrélées (près du cercle) à leurs axes ; deux axes étant orthogonalement projetés sur le même plan. Ceci permet ensuite d'isoler ces couples d'axes par régression linéaire (= régression progressive, OSBORNE, 1984 ; BALENT, 1987).

Ainsi, logiquement en écologie, l'abord initial du complexe maximal perçu (la globalyse) permet, après divers traitements multivariés de classification ou de présentation, de focaliser ultérieurement sur les variables les plus "explicatives"... qui sont souvent celles sur lesquelles portent des décisions.

6.5. Estimations et décisions

6.5.1. La démarche

Toute l'interprétation des données tend à une synthèse et une généralisation où, face aux faits objectifs (DICs), l'expert - ce personnage collectif (p. 342) - s'efforce de restituer une description totale de la portion du champ écologique qu'il décrit à partir des seules DICs de la globalyse. Moyennant les seules hypothèses tablatrices (p. 359), il est possible de décrire des liaisons entre entités et critères (p. 367). Ces statistiques descriptives ne font rien intervenir, au moment du traitement, que d'objectif : elles reflètent synthétiquement l'acquis de la globalyse aux propositions tablatrices près. Cette exploration des données est enfin fondamentalement déterministe liant le résumé des données à l'objet étudié. Dès qu'une tentative d'interprétation simplificatrice intervient, la classification et les classements l'illustrent, l'expert réapparaît et prend des décisions.

Ces décisions peuvent être prises *a priori*, par intuition ou nécessité (tels les choix de l'ADD) mais peuvent aussi *posteriori* être testées en pratiquant des estimations sur les propriétés des classes établies et en s'assurant de la validité relative de la décision par des aides à la décision permettant d'apprécier, voire de mesurer, la part de risque prise. Cette part étant estimée en termes d'aléas affectant la généralisation (inférence), autrement dit la validité probable de celle-ci.

Nous avons vu (p. 357, fig. 6-4) que les deux Processus Répétitifs d'Accroissement des Connaissances sont marqués par des étapes impliquant des choix (décisions) qui peuvent être arrêtés d'emblée ou s'appuyer sur des statistiques probabilistes permettant d'apprécier le risque découlant des aléas liés aux limites de l'acquisition des données donc à la faiblesse de l'interprétation.

En fait, dès l'assemblage (p. 360), dès l'allotement (p. 363) et dès la classification ou le classement, l'idée de regrouper comme "identiques" des éléments constitue une généralisation : l'acceptation de l'hypothèse implique que cette identité est suffisamment grande pour que les différences soient négligeables, et que par généralisation les différences acceptées constituent le cadre de ces objets "identiques".

Ces inférences sont le seul moyen pour combler les vides que nous avons entre les DICs de la globalyse et la réalité du champ écologique. L'expert pose que dans la réalité toute autre DIC prédite depuis les propriétés de l'ensemble sera validée ; il doit pouvoir vérifier que cette proposition est relativement probable.

L'inférence implique donc à la fois un risque et une réfutabilité : elle tend à combler dans la synthèse les vides informatifs de la globalyse par des hypothèses testables par un contrôle. L'inférence statistique joue donc un rôle-clé pour l'écologie : elle est la prise opérationnelle de risque fondée non sur des supputations ou élucubrations mais sur une construction à partir des DICs et d'une prise de risque explicite et réfutable, donc scientifique, donc écologique.

Sa fonction opérationnelle en science est si considérable que nombre de chercheurs confondent les statistiques avec ces seules statistiques inférencielles et oublient l'importance grandissante des statistiques descriptives sommairement présentées au paragraphe 6.4.

Ces statistiques inférencielles sont fondées, il est vrai, sur un développement historique ancien qui trouve ses racines au XVIII^{ème} siècle, avec les jeux de hasard. Elles étaient adaptées aux pratiques réduites et aux moyens de calcul limités, alors disponibles, puisqu'elles se fondaient sur des séries statistiques simples, c'est-à-dire sur une série de valeurs d'un critère en fonction de quelques entités. Si ultérieurement leurs aptitudes ont été étendues à de nombreux objets et de nombreuses variables, fondamentalement la pertinence des outils des statistiques inférencielles est souvent grande pour les seules séries statistiques simples, en opposition avec les objectifs globaux de l'écologie.

<<La comparaison systématique des variables deux à deux, faite ordinairement sur de petits tableaux obtenus par tris croisés (...) nous paraît devoir être abandonnée. Car d'une part, ces comparaisons binaires sont fastidieuses et bien moins suggestives que l'analyse factorielle de grands tableaux de correspondance obtenu en juxtaposant tous les petits tableaux binaires (...). Tout au plus recourra-t-on à la comparaison binaire pour confirmer un rapprochement apparu sur un axe de rang élevé (donc moins sûr que les premiers) issu de l'analyse factorielle. > > (BENZECKI *et al.*, 1973).

Cette opposition n'est pas aussi conflictuelle qu'il pourrait paraître. Grâce à la statistique descriptive, l'écologie ordonne, classe, au prix des seules propositions tablatrices ; il peut conduire l'essentiel du Processus Répétitif d'Accroissement des Connaissances de comparaisons typologiques.

11 peut par ailleurs engager des recherches spécifiques liées à des séries statistiques simples ou plus complexes pour la modélisation (p. 390) notamment.

Mais il lui faut ultérieurement décider sur la qualité de Classes, ou d'ajustements ou de différences. Ajoutons que, dans les recherches finalisées, ces études doivent privilégier certaines variables, notamment pour des décisions à but socio-économique. L'analyse décisionnelle peut être multivariée (ADD) mais sera aussi souvent paucidescriptive en raison de motivations focalisées (Ex : le pesticide X a-t-il eu un effet sur le nuisible visé ?).

Connaissant mieux, grâce aux statistiques descriptives, la nature des variables et de leurs liaisons vectorielles parmi les axes, il est possible de se poser des questions particulières issues de cette observation globale. Parmi celles-ci le fait que deux variables issues du champ écologique apparaissent comme proches dans l'AFC prouve-t-il que leurs distributions dans ce champ sont liées ? Quelles est la signification de leurs corrélations (= relations mutuelles) et quelles formes mathématiques prennent-elles ?

A l'inverse, lorsque la distribution de quelques variables semble indépendante, cette indépendance est-elle réelle ou simplement le fait d'un échantillon trop petit qui, au hasard, a fait apparaître des différences ? Quelle est la probabilité que ces différences soient réelles ?

En systémique les différences entre valeurs ajustées et valeurs prédites sont-elles significativement différentes ? De même, entre données prédites par un modèle et données observées dans un écosystème ?

Enfin vis-à-vis d'une variable précise le mode d'échantillonnage n'a-t-il pas conduit à sa sur-représentation ou sa sous-représentation ? Avec quels degrés de certitude la valeur moyenne obtenue pour la série statistique est-elle, hors les biais techniques systématiques, représentative de cette caractéristique dans le champ écologique ? En un mot, quelle est la fiabilité des conclusions particulières pour une conclusion plus générale ?

Ce type de questions revient à étudier, variable par variable, leurs propriétés intrinsèques en organisant, ou réorganisant si nécessaire, les données à partir des DICs pour une observation différente des caractéristiques. L'étude de la probabilité d'existence des valeurs des caractéristiques par rapport aux objets étudiés mais aussi en considérant ces objets comme représentatifs d'un tout, est le domaine où les statistiques stochastiques peuvent apporter, en cas de doute, une aide à la décision. 11 est hors de propos de développer celles-ci dans ceL ouvrage : elles font l'objet d'une bibliographie bien documentée.

Je ferai une mention spéciale pour l'ouvrage de SCHERRER (1984) qui met pragmatiquement à la portée des non spécialistes ces techniques en les liant de façon classique aux problèmes méthodologiques et d'échantillonnage ; il précise les domaines d'application et donne aussi de façon très explicite les modes d'emploi et quelques logiciels couramment disponibles. Ce travail préfigure le Système-Expert guidant l'interprétation, évoquée au paragraphe 6.1.3.

Aujourd'hui les logiciels de traitement de données mettent à disposition ces techniques ; le problème opérationnel concret est leur utilisation rationnelle. En effet, elles ont la faiblesse de ne traiter qu'un nombre réduit d'entités (une ou deux généralement) dans certaines conditions d'utilisation et de conduire à isoler celles-ci de leur contexte écologique. Elles ont des limitations d'applications, souvent très importantes, et qui ne doivent pas être perdues de vue, si l'on veut éviter des interprétations erronées. Obtenir des "différences significatives" est une chose, faire en sorte que ces différences signifient quelque chose de vérifiable et ne soit pas un artefact de traitement mathématique est autre chose. La différence hautement significative que entre deux séries statistiques, n'est hautement significative que sur la différence, nullement sur les causes écologiques ayant conduit aux différences observées ; la fausse assurance quelles procurent contribue à certains problèmes environnementaux (p. 481).

La référence majeure des statistiques décisionnelles est le hasard. Toute extension des connaissances hors de leur domaine d'observation est une extension aléatoire : nous passons du mesuré, du connu et de l'observé, à l'extrapolé, à l'inférence, au généralisé. Des événements non contrôlés, non explicites, non explicables sous-tendent les DICs : décrire les DICs reste objectif, tendre à les prendre pour base du tout implique que nous n'ayons aucun "inexpliqué".

Or, chaque donnée nous confronte à notre capacité limitée d'interprétation. Bien des variables ne "s'expliquent pas" ! Pour évacuer ces problèmes temporairement, ou plutôt pour différer leurs solutions (les problèmes étant minorés face à un autre objectif temporairement accessible), nous acceptons l'idée que les différences observées sont dues au "hasard" : ce responsable temporairement de l'inexplicable.

Le hasard est alors un moyen de décision : avons-nous assez observé de faits pour soustraire nos décisions au hasard ou non ? Ou plutôt quel est le degré de risque que nous prenons pour que nos décisions, pas à pas, soient probablement exactes (ou fausses) ? N'avons-nous pas négligé trop de variables, la part du hasard étant trop grande vis-à-vis de l'explicable ?

Remarquons qu'opérationnellement nous essayons de savoir - en tant qu'expert - où nos erreurs (ou nos appréciations les plus risquées) ont été commises exactement (i.e. sur un cas précis très simple), ce qui souligne que les statistiques stochastiques par leur focalisation sur de petites séries statistiques, ne sont pas si inadéquates que cela au travail écologique à objectif global.

6.5.2. L'estimation

L'estimation (ou induction, inférence) statistique est un procédé qui permet le calcul de valeurs inconnues de caractéristiques à partir des valeurs issues du réel, mais non de toutes les valeurs de celui-ci, autrement dit de l'échantillon de ce réel.

Ces estimations prennent en compte trois types de paramètres :

1) ceux liés au réel, c'est-à-dire qui représenteraient la totalité des propriétés du réel (et non seulement ce qui nous est connu). Ce sont des valeurs certaines (déterminées) mais usuellement inconnues (inaccessibles),

2) ceux liés à l'échantillon, telle la moyenne, l'écart-type, etc, estimés sur cet échantillon ; issus de la globalyse, ils sont connus et déterminés,

3) ceux liés à une loi de probabilité choisie, connue mais dont la valeur est incertaine à un degré de probabilité près $(n-1):(n-1)$ à cause du fait qu'on estime la moyenne depuis l'échantillon et non depuis le réel.

Ces estimations se font en assemblant les variables traités en ensembles dits "séries statistiques" dont on établit les propriétés communes.

1) Par les paramètres de position :

la) la moyenne arithmétique

$$(1) \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

(n = nombre de xp Xj = variable numérique)

1b) la médiane : position centrale entre la valeur quantitative la plus petite et la plus grande

1c) le mode : valeur dominante de lots. En étudiant les fréquences des valeurs, c'est la fréquence la plus élevée qui peut être établie pour ces valeurs qualitatives, quantitatives ou floues après allotement. Si la variable est quantitative, cela dépend des choix de l'allotement. En fait, dans une série statistique, il peut y avoir plusieurs modes (plusieurs valeurs localement dominantes).

2) Par les paramètres de dispersion qui nous informent globalement sur la nature de la distribution des valeurs de l'ensemble considéré. Concrètement une même moyenne peut résulter de la moyenne établie sur 5 valeurs numériques identiques ... donc non dispersées (= la moyenne) ou au contraire sur 5 valeurs très différentes qui en moyenne donnent une 6ème donnée.

2a) la variance : est la moyenne arithmétique de la somme des carrés des écarts entre les valeurs initiales et la moyenne

$$(2) \quad \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad \bar{x} = \text{moyenne arithmétique de la population}$$

pour les n données réelles représentant la totalité du réel. On démontre qu'entre la moyenne théorique (du réel) et la moyenne estimée de l'échantillon, dans le cadre d'une distribution normale $\sigma^2 = s^2$, mais que cette variance s^2 diffère de la variance empirique S^2 établie sur l'échantillon statistique. Pour tenir compte du fait que l'on a estimé la moyenne on calcule

$$(3) \quad S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}$$

où n-1 est le DL : le nombre de degré de liberté ;

2b) l'écart type est la racine carrée de la variance s^2 ou S^2 ;

2c) d'autres paramètres de dispersion, coefficient de variation, coefficient d'asymétrie, moment de troisième et quatrième ordre, kurtose, sont d'un usage moins courant ;

2d) la variance s'exprime pour chaque distribution des modalités d'une variable. Lorsque l'on veut situer deux variables (x,y), en dispersion mutuelle, on calcule la covariance. Celle-ci peut être calculée sur un nombre relativement élevé de critères et d'entités sous forme d'une table de covariances (de dispersion) dont la diagonale indique les variances de chacune des variables ;

2e) pour les valeurs qualitatives l'ampleur des modalités d'une variable est la richesse (symbolisée par RtCH, in SCHERRER, 1984) ;2f) la diversité est considérée comme maximale lorsque les attributs sont équiprobables dans chaque modalité. Elle est couramment décrite par l'indice de Shannon applicable aux grands effectifs (pour les petits, il faut utiliser l'indice de Simpson, in SCHERRER, 1984). L'expression la plus usuelle de l'indice de Shannon est :

$$(4) \quad H' = - \sum_{k=1}^K P_k \log_2 P_k$$

H' s'exprime en bit (p_k = probabilité d'avoir la k ème modalité quand l'échantillon n tend vers l'infini) ;

2g) la régularité (ou équitabilité) exprime la diversité par rapport à la diversité

$$R = \frac{H' \log_{2p_k} \sum p_k \log p_k}{H' \max \log j \text{ Rich } \log \text{ Rich}}$$

(r.)

avec log base 2 avec log base 10

3) Pur les lois de probabilité

Ce sont des fonctions mathématiques très diverses, choisies en tenant compte de la distribution des variables pour les résumer, mais par lesquelles l'échantillon du réel ne représente ce réel qu'avec une certaine probabilité.

A partir d'une population statistique réelle, il est possible d'effectuer un échantillonnage séquentiel de plusieurs échantillons successifs, chacun d'eux permet d'obtenir des estimations quelque peu différentes en raison du caractère aléatoire d'un échantillonnage partiel du réel.

A partir des données issues de chacun de ces échantillons, on peut établir un estimateur T (telle la moyenne des moyennes observées) de la population réelle (t) qui sera non biaisé s'il reflète fidèlement celle-ci et d'autant plus efficace que la variance entre les différentes estimations initiales (ici, dans l'exemple, les moyennes) est la même pour le même nombre de variables dans chaque échantillon élémentaire.

Des techniques (par exemple, celle du maximum de vraisemblance) permettent de maximiser les propriétés de l'estimateur recherché.

Le choix de la loi de probabilité dépend, comme déjà indiqué, du mode de distribution des valeurs de la variable considérée, continue ou discontinue, d'une part et de la nature des données, d'autre part.

Lorsque les données sont discontinues et portent sur deux variables seulement, la loi utilisée est la loi binomiale, sauf si la probabilité de certaines erreurs est rare (alors loi de Poisson) ou si l'échantillonnage s'est fait avec prélèvement appauvrissant (sans remise) le matériel réel étudié (alors loi hypergéométrique). Enfin pour les entités dépendant de plusieurs variables, la loi multinomiale généralise la binomiale.

Pour les ensembles ayant une distribution continue, la loi fondamentale est la loi normale (de Gauss-Laplace) qui se prête au calcul des probabilités des écarts autour de la moyenne et constitue la loi la plus employée pour résumer les aléas autour de celle-ci. Mais ici encore d'autres fonctions (lois) peuvent être utilisées, notamment 1) l'exponentielle (p. 412) très importante dans rajustement de cinèses fonctionnelles car directement représentatives des conséquences générales dans les systèmes biophysicochimiques de la formule d'Arrhenius p. 69, 2) le khi-carré d'un usage essentiel pour les tests de comparaison (de proportions, de distributions expérimentales et théoriques, de caractères qualitatifs, de moyennes et de variances expérimentales, d'intervalles de confiance), 3) les tests non paramétriques, etc.

6.5.3. Ltt décision

L'établissement d'un estimateur est usuellement accompagné d'un intervalle de confiance (plus ou moins alpha), celui-ci désigne deux bornes de l'intervalle entre lesquelles l'"expert" sait que l'estimation a une probabilité d'être fausse. On peut préférer la confiance d'être exacte qui exprime usuellement le risque encouru exprimé en pour cent ou pour mille des valeurs par rapport à un estimateur (= 1), 1-alpha ou alpha est classiquement, lorsqu'il est pré-établi, 0,05 (95 %), 0,01 (99 %), 0,001 (999 %).

De tels intervalles de confiance peuvent ne pas être pré établis mais calculés à chaque cas d'espèce, en laissant à l'expert le soin de décider si le risque alpha ainsi pris d'avoir une estimation fausse est acceptable tenu compte de ce qu'il sait des

conditions d'acquisition des données. La situation est en effet totalement différente si les valeurs sont issues d'une acquisition dans un système écologique que l'on sait Liés perturbé puis que ces valeurs ont ensuite subi de fortes manipulations tabloires ou si, à l'inverse, elles sont issues directement d'un microcosme expérimental, avec le contrôle rigoureux des divers composants assuré pour obtenir une bonne reproductibilité.

L'expert peut alors, pour un même risque d'erreur alpha être conduit à considérer l'estimation comme bonne car peu affectée par les nombreux aléas incontrôlables, ou au contraire comme mauvaise car, dans un microcosme bien contrôlé, révélatrice d'une aberration expérimentale.

Cette décision est elle-même un jugement à double tranchant

- si l'on rejette une interprétation en fait acceptable, on commet une erreur de type alpha (ou de première espèce),
- si l'on accepte une interprétation erronée, on commet une erreur de type bêta (ou de deuxième espèce).

Il s'agit d'erreur sur l'acceptation d'un estimateur (DSE) et non sur DIC.

Pour appuyer de telles décisions, il est d'usage de produire explicitement une hypothèse nulle (ou principale) H_0 relative à l'objet d'étude. Par exemple, il n'y a pas d'effet du produit x sur la population naturelle de collemboles (*Le.* cette population traitée ne diffère pas significativement par rapport à un témoin).

L'hypothèse opposée (H_1) serait : il y a une différence "significative" entre témoin et traité. On établit alors un test d'hypothèse statistique qui établit les risques encourus (alpha ou bêta).

Les modalités de calcul du risque alpha (de déclarer non différent une différence effective) et du risque bêta (de déclarer différent une identité) ne sont pas les mêmes (mais le calcul du risque bêta n'est pas toujours possible), de sorte que la décision de l'expert dépend du choix qu'il fait entre ces deux risques contradictoires, mais aussi de son opinion sur la qualité des tests d'hypothèses statistiques utilisés.

Ces tests peuvent être bilatéraux ou unilatéraux - dans le premier cas, on cherche la différence entre les deux situations comparées, que cette différence se fasse en plus ou en moins - dans le second cas, l'hypothèse précise que cette différence doit être uniquement en plus (ou en moins).

La diversité des tests potentiellement utilisables est assez grande mais leurs conditions restrictives d'application ne sont pas moindres de sorte qu'il faut choisir en fonction de leurs qualités. On dira qu'un test est plus puissant qu'un autre lorsqu'il fournit pour le risque alpha, un risque bêta plus petit. On dit qu'un test est robuste lorsque, en pratique, on ne respecte pas totalement les conditions d'application et que néanmoins ses résultats en sont peu affectés.

Les tests à mettre en oeuvre dépendent, tout comme les lois de probabilité, de la nature des données (paramétriques ou non paramétriques), des lois empiriques (observées) de distributions des données et du mode d'échantillonnage (indépendant ou apparié). Ils portent enfin sur les comparaisons de moyennes ou les comparaisons de distribution (variances et écarts-types) ou la comparaison de fréquences ou proportions (y compris pourcentages).

Enfin, on peut chercher à valider des connaissances antérieures qui permettent de prédire des résultats respectant donc des distributions de valeurs (ou de lots) de variables. Ces prévisions (p. 346) sont des distributions théoriques qui peuvent être validées par des tests de conformité (khi-carré, test G, Kolmogorov-Smirnov,...) par de nouvelles données empiriques observées, des tests de contrastes permettant de localiser les données non conformes à la prévision. Leurs limites d'emploi, leur robustesse et leur puissance diffèrent beaucoup ; le choix des tests, comme des lois de probabilité, est délicat et doit être fait avec l'aide d'un statisticien, d'un guide automatique, voire d'un Système-Expert ou en référence à un ouvrage explicite (SCHERRER, 1984).

6.6. Modélisation systémique

6.6.1. Modélisation

Expliquer des états différents conduit souvent l'écologue à évoquer les cinèses qui expliquent des changements d'état (diachroniques ou/et spatiaux). Ces interprétations sont empiriques, subjectives ou étayées par la connaissance de potentialités fonctionnelles des systèmes auxquels il se réfère. Ces évocations peuvent toutefois être trompeuses ; des processus contradictoires interviennent et surtout, certains mécanismes des systèmes écologiques étant inconnus, nos reconstructions intellectuelles risquent d'être profondément erronées.

Par exemple, considérer qu'une maigre végétation prairiale résulte d'une non croissance des plantes ou au contraire d'un excès du pâturage est matière d'appréciation ; de même l'accroissement d'une biomasse ou d'une nécromasse, ou de tout autre compartiment, peut s'accompagner d'une augmentation des pertes du compartiment ; il suffit que les gains soient supérieurs aux pertes pour qu'il y ait accroissement. Enfin, un élément très "important" en tant qu'étal peut jouer une fonction d'échange mineure alors que l'inverse peut être vrai ; c'est le paradoxe systémique (p. 45).

Si l'organisation fonctionnelle, lorsqu'elle est (exceptionnellement) connue, permet une prévision de la nature des fonctions, elle ne donne ni les intensités ni les facteurs régulant ces intensités. Observer des transformations oblige à quantifier de façon réfutable les échanges qui ont conduit à ces transformations.

La modélisation est l'ensemble des activités visant à représenter le réel par des modèles. La modélisation est fondamentalement un processus visant à la représentation d'un objet réel par un (ou des) modèle(s), soit sous forme matérielle "imitant" l'objet, soit sous forme didactique schématisant cet objet de façon intelligible, soit sous forme mathématique.

La modélisation est un processus opérationnel qui conduit à une élaboration croissante mais nécessairement imparfaite, ne serait-ce que parce que nous n'avons que la globalyse comme moyen de perception du réel. Elle ne peut donc être considérée comme achevée car le (ou les) modèle(s) produite(s) est (sont) toujours perfectible(s).

La science en général, et l'écologie particulièrement, en raison de sa silnation en devenir, n'a pas l'ambition de traduire une Vérité mais au contraire de tendre à représenter le réel de la façon la moins imparfaite possible ; il s'agit d'une démarche par approximations successives visant la réduction des erreurs. La modélisation permet de confronter l'idée que l'on se fait, ou/et les données que l'on a à la réalité. Toute activité cohérente d'écologue, même à son insu, se réfère à un modèle... voire une modélisation. <<Like Molière's Bourgeois Gentleman, who was gratified that he had been speaking prose all his life, we discover at the outset that we have been building models all our lives>> (RUTTER, 1973). Le problème est de formaliser cette modélisation explicitement.

La modélisation constitue presque totalement à elle seule l'un des deux Processus Répétitifs d'Accroissement des Connaissances écologiques (p. 357). En effet, elle résume les démarches cognitives (diagrammes notamment), expérimentales (microcosmes) et synthétiques (infomodèles) de la systémique qui, en outre, étudie les systèmes réels comme moyens de valider les modèles et comme source de connaissances objectives. Ce PRAG diffère radicalement de celui de comparaison-typologie (p. 367) par le fait qu'il s'agit d'une élude visant à la description des interactions dans les systèmes expliquant états des compartiments et cinèses entre compartiments, c'est-à-dire s'appuyant sur la connaissance interne des composants des systèmes. Ultérieurement, un modèle peut être étendu par ajout de composants connectables. La modélisation systémique va du particulier au général, en étendant la portée des modèles dans les trois référentiels : composition, espace et temps.

6.6.2. Théories et pratiques des systèmes

En écologie, science globale du complexe, la "théorie des systèmes" est souvent présentée comme un tout cohérent, comme une théorie homogène pré-existante. D'une certaine façon, cela est exact. De nombreuses disciplines physiques, logiques, chimiques, etc. ont une théorie des systèmes en propre. Ces théories traduisent abstraitement les objets concrets de ces disciplines ; elles en sont le modèle conceptuel conduisant à des réalisations concrètes en cybernétique, automatique, génie chimique, informatique, ... Une symbolique spécifique s'attache à chacune de ces pratiques et chacune isolément a fait ses preuves dans chacun de ces divers domaines spécifiques.

L'influence conceptuelle de ces diverses théories des systèmes sur l'écologie est profonde... Elle inspire explicitement TANSLEY (1935) lors de la définition des écosystèmes : <<**These ecosystems, as we may call them, are of the most various kinds and sizes. They form one category of the multitudinous physical systems of the universe, which range from the universe as a whole down to the atom. The whole method of science, as H. Levy (1932) has most convincingly pointed out, is to isolate systems mentally for the purposes of study, so that the series of isolates we make become the actual objects of our study, whether the isolate be a solar systems, a planet, a climatic region, a plant or animal community, an individual organism, an organic molecule or an atom. Actually the systems we isolate mentally are not only included as parts of larger ones, but they also overlap, interlock and interact with one another** >>.

Comme les écosystèmes forment un tout, l'écosphère, la systémique joue (ou devrait jouer) nécessairement un rôle central dans la théorie et la pratique écologique. La modélisation, constituant la traduction mentale de notre perception partielle d'objets d'étude, ne peut être qu'une contribution à cette systémique qui synthétise nos connaissances sur l'anatomie physiologie" des systèmes écologiques. Elle tend à reproduire ceux-ci, même liés incomplètement, donc imparfaitement, pour leur ressembler, c'est-à-dire les simuler, ce qui rend possible la comparaison pour évalidation. Soulignons ici que la notion de système diffère de celle de modèle car elle est une abstraction directement concrétisable à un réel alors que le modèle est une abstraction réfutable (p. 43).

Mais en pratique, les écologues ont emprunté à d'autres disciplines les concepts, schématisations et symboliques systémiques. Comme chaque discipline a sa pratique propre un certain imbroglio en résulte nécessairement, (pour la valeur théorique voir les réserves de Thom, p. 105). En pratique aussi, l'écologue ne peut individuellement aborder la synthèse systémique que par un objet d'étude restreint et spécialisé. En pratique enfin, la réalisation de modèles matériels (microcosmes, p. 400) et mathématiques (p. 401) est au départ restreinte ; notamment les infosystèmes emprunteront les modèles mathématiques développés par des disciplines aux applications restreintes.

Tant la théorie systémique que la modélisation en écologie reflètent nécessairement cette situation. Par exemple, il est tout à fait légitime en automatique ou informatique, de parler de rétro-action et de bouclage (fig. 1-9, p. 89) : un composant agit dans le système de telle sorte qu'il réagit sur lui-même. Certes un délai temps est nécessaire mais le système mécanique ou électronique est considéré comme structurellement constant. C'est sa fonction, que l'on décrit, et ce fonctionnement, à la différence des écosystèmes, ne modifie pas sensiblement leur structure matérielle. Cette fonction est reproductible dans un tel système qui conserve son intégrité (s'il n'est pas en panne). Ceci est légitime dans le cadre de telles disciplines.

Transposées à l'écologie, une telle symbolique et pratique modélisatrices obligent à poser explicitement (ce qui n'est souvent fait qu'implicitement) que le système étudié est structurellement constant en fonction du temps. Or, on sait qu'un système écologique quelconque ne peut pas être considéré comme constant, au

contraire il évolue toujours peu ou prou (p. 96). Il y a même une autre modélisation, celle des transformations de 1 ou n compartiments étudiés diachroniquement (par des onctions différentielles ou de récurrences, p. 410), qui porte précisément sur ces transformations.

Cela ne signifie pas que l'on ne puisse pas temporairement négliger ce point et étudier (décrire) de façon "instantané" (= temps à l'arrêt) un système écologique, par exemple par un modèle à compartiments. En pratique, on peut également considérer comme métastable le système étudié. C'est souvent le cas pour des écosystèmes naturels ne subissant pas de perturbations catastrophiques (feu, bouteur,...) et atteignant ainsi un certain équilibre. Par exemple, les populations lombriciennes en prairie permanente ne varient pratiquement pas sur quelques décennies. "Pratiquement pas" signifiant ici que les difficultés de collecte de données et l'imprécision de représentativité des échantillons diachroniques sur de telles prairies outrepassent les variations qui peuvent se produire.

Toutefois, ces diverses pratiques, parfaitement justifiées tour à tour, méritent d'être resituées dans une stratégie globale de recherche car leurs présupposés, souvent implicites, méritent d'être explicites afin de situer la contribution de chaque modèle et les limites de sa portée dans une intégration globale. Il faudrait réaliser, pour des systèmes évoluant, des modèles évoluant. Cela peut se faire par la transposition spatiotemporelle des modèles en "calant" leurs états initiaux sur chaque nouvelle situation locale. Par exemple, le modèle REAL est un infosystème à compartiments qui reproduit les fonctions sous variables d'entrée climatiques et d'état de peuplements lombriciens considérés comme à "biomasse constante" pour les raisons évoquées ci-dessus. Ce choix opérationnel se justifie par le fait que les variations spatiales ou/et temporelles importantes de biomasse résultent notamment d'actes humains. Ce fait est pris en compte "hors modèle" par la transposition de REAL sur de nouvelles placettes échantillonnées dont les variables initiales de biomasses lombriciennes mesurent les effets des actes : la carence spatiotemporelle intrinsèque à ce modèle est "compensée" par sa transposabilité (p. 416).

La transposabilité des modèles n'est pas un problème mineur - elle est en pratique liée à l'aptitude que nous avons (ou n'avons pas) d'acquérir les variables d'entrée des modèles (= variables initiales + d'ambiance). D'une façon générale, cette transposabilité décroît avec l'augmentation de complexité du modèle qui, sauf par connexions nombreuses, exige un nombre croissant de variables d'entrée.

On conçoit dès lors que des modélisations partielles et incomplètes puissent être opérationnellement fructueuses si, mais nécessairement si, la cohérence écologique est assurée. Il faut notamment vérifier la connexité effective des compartiments en fonction des connexions réelles ce qui est loin d'être toujours le cas (*cf.* notion d'écosystème, p. 107).

Il faut vérifier aussi que le nombre de variables d'entrée n'est pas très supérieur à la valeur prédictive du modèle : c'est souvent le cas des modèles à un compartiment (ou quelques compartiments à faible connexité, comme les modèles prédateurs-proies) dont la seule simulation est des l-généralis diachroniques alors qu'ils dépendent de très nombreux exnéats (dans le cas du modèle prédateur-proie, de toutes les autres interactions biocénétiques, climatiques, des actes, ...).

De toute façon, il y a nécessité opérationnelle de situer toutes modélisations les unes par rapport aux autres pour juger par des heuristiques de leur utilisation systémique. Ceci implique une "théorie" écologique des systèmes. Celle-ci a été abordée en permanence notamment, au chapitre I (surtout p. 31, 72, 88), au chapitre II (p. 107, 133, 156) et dans ce chapitre (p. 357). Résumons-la.

Un système écologique concret a toujours les propriétés d'être constitué de compartiments qui échangent en fonction de l'espace et du temps. La compartimentalisation de ce système, dépendant du choix d'objectifs de recherche (p. 267) vis-à-vis d'un objet concret, représente une partie de la composition (p. 37) du

système à niveau d'observation n , le système étant le niveau $n + 1$; le couple $\langle n, n + 1 \rangle$ constituant un système.

Chaque compartiment peut être décomposé à son tour en un système à compartiments et devenir ainsi un système. Réciproquement, chaque système $(n + 1)$ peut être regardé comme compartiment d'un sursystème $(n + 2)$. Le sursystème et le système initial $(n + 1)$ forment un système $\langle n + 1, n + 2 \rangle$ et le sous-système, décrivant un compartiment n , forme un autre système $\langle n, n - 1 \rangle$.

Les valeurs décrivant les caractéristiques d'un compartiment sont les variables d'état et les échanges (débits et flux) entre deux compartiments sont des cinèses. Les cinèses et états sont les composants du système et sont nécessairement situés par rapport aux trois référendaires : espace, composition et temps (fig. 1-12, p. 99). Les cinèses assurent l'indispensable connexité des compartiments. Les états changent du fait des cinèses et réciproquement.

La modélisation est un acte technique qui tend à reconstituer, à partir de faits analytiques (niveaux n), un niveau plus global $(n + 1)$ par synthèse. Elle s'appuie sur la globalyse d'un système écologique pour tendre à produire un infosystème mimant ce système. Elle peut être conceptuelle par des heuristiques et des faits décrits notamment à l'aide de diagrammes, exploratoire dans les microcosmes et mathématique (numérique) dans les infosystèmes. Partant du particulier au général, ces modélisations négligent au départ souvent un référendaire, par exemple le temps dans les changements d'état de certains modèles à compartiments et l'espace dans les modèles diachroniques de changement d'état. La simulation par infosystèmes exige alors des variables d'état initiales (innéats) et des variables d'ambiance et d'entrée en cours de simulation (= exnéats, décrivant notamment les cinèses d'entrée depuis l'entour).

Les limites des modèles font que leurs propriétés ne reflètent qu'une partie des innéats et exnéats connus d'un système écologique. L'ajout d'heuristiques permet (tra) de justifier ces choix élémentaires par des règles procédurales permettant d'utiliser les faits disponibles dans les trois référendaires de l'écologie par le moteur d'inférence d'une Base de Connaissance (fig. 5-2, p. 311, 6-12, p. 403). Ceci permettra à chaque expert, contribuant à l'écologie, d'apporter sa compétence explicitement au niveau de la perception qu'il appréhende dans des Systèmes-Experts écologiques. L'intégration des connaissances est alors possible.

Le caractère limité des modèles, le fait qu'ils soient multiformes, car ils sont toute représentation mimant les systèmes, et enfin leur relation au concret, parfois purement abstraite ou parfois permettant une réfutabilité effective par validation, ont pour conséquence que l'expression générique de modèle recouvre des pratiques diverses et des applications spécifiques induisant de nombreuses connotations.

6.6.3. Notions et pratiques des modèles

1. Ixi modèle

Le modèle est la substitution de l'artificiel au réel en représentant la connaissance perçue du réel par un mime artificiel. Le mime, ou modèle, peut être une figure, un objet physique ou/et une transcription logico-mathématique d'une portion de l'écosphère. Cette substitution cherche à reproduire hors champ écologique tout ou partie de ce champ pour s'assurer que le savoir (= la connaissance, l'information) sur ce champ est suffisant pour décrire, pur reproduction à l'identique, la portion concernée du champ écologique.

Cette portion du champ écologique décrite est l'objet du modèle décrit par ses composants (p. 91) ; par ailleurs des variables externes agissent sur ce modèle en tant qu'entrées/sorties et variables d'ambiance régulatrices du modèle. Les variables externes coïncident avec les mésonéats et actes ; les variables d'ambiance avec certains mésonéats. Les entrées initiales (= innéats) et facteurs régulateurs doivent être fournis au modèle pour assurer son fonctionnement tandis que les sorties (= généraux) résultent de ce fonctionnement. Le modèle, étant une substitution, ou plus

exactement, une représentation que l'on se fait d'une réalité, ne peut fournir que des DSEs ou des DEPs. Les données qu'il produit incorporent les hypothèses morphofonctionnelles adoptées dans la réalisation du modèle et ne peuvent en aucun cas être des DICs (issues des systèmes écologiques) auxquelles les DSEs produites en sorties peuvent être confrontées pour validation (écovalidation).

Le modèle est toujours "(in)valide" mais plus ou moins gravement. Décrire les carences du mime permet de reprendre les recherches, si nécessaires par acquisition de données nouvelles ou par amélioration des traitements de synthèse, pour un modèle plus évolué, mais toujours réfutable face au réel.

Les modèles ne peuvent donc pas être des fins en soit mais seulement des traductions extemporanées d'un processus continu de modélisation. La modélisation du Processus Répétitif d'Accroissement des Connaissances systémique tend, à partir de nos perceptions (partielles et insuffisantes) du réel, de le représenter : c'est donc la démarche synthétique par excellence. A un moment, le modèle (tenu à jour) est notre meilleure perception de l'objet qu'il tend à reproduire : pour les décideurs, il constitue l'assise la plus sérieuse.

2. Distorsions des pratiques

On retrouve dans l'élaboration et surtout la justification des modèles tous les pré-supposés, les ambiguïtés, voire les confusions, qui peuvent conduire à décrire de simples placages sur la réalité en termes de modèles dont on voit mal l'intérêt... y compris d'être réfutés (DANCHIN, 1979). Ainsi en "écologie" de nombreux modèles abstraits sont souvent présentés comme "théoriques", en raison de leur caractère spéculatif et surtout inadéquat aux systèmes écologiques (= non réfutable). La modélisation ne constitue donc pas par elle-même une garantie. La critique de l'« excuse absolutoire du pouvoir heuristique des modèles » est assurée ailleurs (Delattre et Thellier, 1979) ; contentons-nous ici d'une approche pragmatique sans prétendre prévenir ces pièges épistémologiques.

Pour tout objet d'étude, la démarche idéale serait 1) un énoncé d'objectifs permettant l'élaboration d'un modèle conceptuel, 2) l'obtention de données adéquates et précises permettant une bonne gestion de celles-ci et 3) la synthèse par infosystèmes explicites permettant un contrôle des résultats à chaque stade avec le niveau de perception correspondant au niveau de globalyse de cette sortie, 4) une validation par rapport au système écologique réel (= écovalidation).

Dans la pratique de la modélisation et du choix des démarches, les choses sont infiniment plus confuses en raison de trois pratiques complémentaires :

1) Au niveau de l'acquisition des données, l'analyse est presque toujours pratiquée sans modèle conceptuel explicite ; y en aurait-il un, que la découverte de faits le remet en cause (p. 301) : beaucoup de données sont incohérentes à une synthèse (p. 42, 157).

2) Les efforts techniques pour obtenir des données écologiques (p. 41) adéquates sont souvent détournés par la mise en oeuvre de démarches para-écologiques (p. 452) ; par exemple, par l'acquisition de données en microcosmes dont la signification vis-à-vis du champ écologique est hypothétique (p. 400).

3) Les difficultés matérielles, la pression des demandeurs (exigeant une "réponse" sans délai et sans moyens d'étude adéquats), un désir de démarches "holistiques", conduisent souvent à l'énoncé de modèles abstraits sans souci de leur aptitude à l'écovalidation. Ces spéculations s'expriment par l'énoncé 1) de compartiments et de cinèses que l'on ne sait mesurer, 2) de concepts obscurs, etc.

Ceci ne signifie pas que de telles situations doivent être rejetées d'emblée pour la modélisation. Une approche abstraite peut permettre une élaboration conceptuelle, par sa remise en cause ; une expérience en microcosmes peut constituer une étape pour réduire les hypothèses ; enfin les spéculations, par leur impasse, peuvent

conduire à une prise de conscience de la nécessité d'objectifs authentiquement écologiques.

Les démarches étant par approximations successives, il est clair qu'un désir de connaissances peut s'exprimer à partir d'un modèle abstrait, simulé ou non, avec des données inadéquates et des hypothèses invérifiables. Toutefois, le balbutiement ne saurait être confondu avec un acquis scientifique, ce qui est malheureusement souvent le cas car, dans le court terme, une supputation pseudo-scientifique est plus économique qu'une recherche. Nous évoquerons ci-dessous ces problèmes d'objectivité des modèles.

Les modèles désignent les produits temporaires de la modélisation. Un modèle ne contiendra jamais toutes les caractéristiques des systèmes réels car il reflète les options, ayant limité les données, et les propositions limitant son domaine. Ce domaine est opérationnellement borné sur les trois référendaires : le temps, l'espace et les composants de la composition effectivement pris en compte. Très souvent, le mot modèle désigne un cas particulier des étapes de la modélisation en raison de la spécialisation de cet outil et de son (ses) utilisateur(s). Ce terme générique reçoit alors une connotation non explicite qui est souvent fort gênante, par exemple, celle-ci sera réduite à la seule réalisation de diagrammes par H.T. ODIJ.M (1982) ou aux seuls modèles mathématiques par de nombreux mathématiciens.

Autre "glissement" sémantique très fréquent, le mot modèle signifie aussi pour un peintre l'objet réel auquel il substitue sa représentation : le tableau. C'est l'inverse de la définition opérationnelle adoptée ici !

Encore plus gênant entre ces deux significations, "l'objet et son mime", se glissent des significations intermédiaires. Dire que tel matériel est un bon modèle d'éluide est parfaitement ambigu : est-ce à l'objet ou au modèle auquel on se réfère ? Par exemple dire que *Eisenia fetida* est un bon modèle pour les tests de toxicologie sur lombriciens" signifie pragmatiquement que cette espèce est un bon matériel (objet) pour effectuer ces tests mais peut conceptuellement, et simultanément, être entendu comme bonne espèce se substituant aux autres lombriciens dans l'appréciation toxicologique générale (comme mime des lombriciens dans le champ écologique). <<The term "modelling" is used in so many confusing ways in various fields of human interest that it is not always obvious which is the model and which is the mimic.>> (SKELLAM, 1972).

Comme on le voit le mot modèle est d'un usage confus, voire contradictoire ; dans l'ensemble du domaine écologique, sa pratique serait à proscrire puisque l'on ne sait plus quel est le mime du mimé ; en outre il est comité, affectivement certains sont attachés à des modèles particuliers (sols reconstitués, figuration de distribution, ajustement mathématique, ...) alors que le terme est générique (= tout mime, toute représentation mimée). Curieusement, en français le mot modélisation n'a pas cette ambiguïté, car il se réfère au processus de réalisation du mime et seulement à celui-ci.

Dans toute la mesure du possible il vaut donc mieux substituer, pour le mime, une désignation plus précise que "modèle" (p. 393).

3. Objectivité écologique des modèles

Il y a lieu de ne pas placer sur un même plan les modèles très loin d'être opérationnels et ceux qui constituent un outil effectif d'accompagnement de la recherche scientifique. Il faut notamment lutter contre l'effet pervers résultant du fait que les modèles les plus rapidement constitués, les plus rapidement simulés (mais non validés) sont ceux dont les *a priori*, hypothèses et inadéquations sont les plus nombreux : il suffit trop souvent d'imaginer les données, les fonctions et la structure d'un intosystème plausible pour être convaincant auprès d'un auditoire, peu exercé à la réfutation. Enfin, il ne suffit pas qu'une démarche se prête à modélisation : il faut que le modèle soit réfutable pour être scientifique.

Pour réduire ces très fréquentes perversions, en éliminant les problèmes strictement techniques de collecte de données, d'ajustement mathématique linéaire ou

De façon non explicite, la dégradation énergétique extramétabolique des endentères est négligée de même que celle émanée sous forme d'élaborats ou d'excréments non digestifs.

C peut être, comme F, calculé par des mesures gravimétriques et énergétiques sur les aliments ayant été consommés et sur les fèces déposées en microcosmes, c'est-à-dire en modèles artificiels.

R est estimé à partir de considérations d'équivalence énergétique sur l'oxygène inhalé ou/et du CO₂ exhalé ; ces gaz sont mesurés en microcosmes spécifiques : les respiromètres.

P est enfin estimé à partir du changement de la biomasse (changement d'état) entre deux dates. C'est la seule donnée qui peut éventuellement provenir du champ écologique (quoique les données d'études de terrain, souvent difficiles, se prêtent peu aux estimations de biomasses dans de nombreux groupements zoologiques, cf. PETERSEN, in PETERSEN et LIJXTON, 1982). En outre des corrections thermiques sont effectuées à partir de la température (T) d'un horizon de sol et non de la température des animaux !

En conséquence l'équation proposée ci-dessus est un modèle mathématique issu d'un modèle conceptuel dont les données sont des Données Expérimentales de Potentialité pour C, R, F et des données écologiques (P), inadéquates (T), qui, au prix de deux oublis (dégradations digestives et non prise en compte des émanations d'énergie biochimique), permettent d'obtenir des "résultats".

De toute façon ces "résultats" ne peuvent être validés au terrain, faute d'avoir développé antérieurement les techniques adéquates pour ce contrôle. Il est clair que l'alternative "donnée inadéquate" a été choisie, faute de mieux, pour une estimation non réfutable. Il s'agit d'un modèle mathématique para-écologique (p. 453) fondé sur des données de microcosmes et validable seulement en microcosme, c'est-à-dire un modèle de modèle, donc un modèle spéculatif.

Une autre alternative eut été de choisir un modèle conceptuel non énergétique : par exemple, le suivi effectif d'éléments chimiques dans les cycles avec des isotopes. Ceci peut être plus facilement réalisable en combinaison avec des techniques de mesures écophysiologiques *in situ*.

Les modèles spéculatifs ont souvent des propriétés didactiques intéressantes, mais ne peuvent généralement être documentés et, en tout cas vérifiés au terrain car, congénitalement, ils partent des idées que l'on se fait de la nature et non de celle-ci. Ils peuvent par contre permettre de représenter schématiquement, ces idées, y compris relativement à des systèmes aussi complexes que des écosystèmes ou des agro-écosystèmes. Mais ces constructions intellectuelles ne peuvent être qu'hypothétiques. Non dépendants des faits, ces modèles spéculatifs permettent le libre cours de l'esprit et peuvent donc être l'expression de démarches brillantes.

2) D'autre part, depuis les données elles-mêmes, on est conduit à effectuer des modélisations "élémentaires" : de simples ajustements à des fonctions mathématiques. Ces modèles ont le mérite d'être fondamentalement objectifs, au sens strict de liés aux objets étudiés et sous réserve des hypothèses d'inférence qu'ils impliquent et de propositions tablatrices souvent limitées. Leur qualité dépend alors essentiellement de la finesse de l'ajustement entre données du modèle mathématique calculé et données effectivement mesurées (DICs). Ces modèles résumant essentiellement les faits (données + opinions d'expert) seront appelés factuels.

A ce stade, les infosystèmes dérivent évidemment des données acquises. Ils peuvent entraîner la recherche de données complémentaires, nécessaires à une élaboration plus complète ou plus précise. Notons qu'un modèle fondé sur des données peut tendre à représenter soit des faits issus du champ écologique, c'est-à-dire des DICs, soit des données issues d'un dispositif artificiel (des DEPs) comme décrit ci-dessus en 1). Dans les deux cas, l'infosystème est factuel puisque issu de données reliées à un objet. Il peut être vérifié par rapport à celui-ci. Les infosystèmes factuels ne sont pas nécessairement ceux issus de DICs mais peuvent être des modèles de modèles (= l'objet est un microcosme).

Pour l'écologie, il faut donc distinguer, d'une part les infosystèmes factuels fondés sur des données artificielles et d'autre part, ce qui est l'objectif de son étude : c'est-à-dire les infosystèmes écologiques synthétisant des DICs issues de l'écosphère.

Soulignons ici que ce constat conduit à privilégier, pour une problématique écologique, les compartiments et cinèses effectivement écologiquement mesurables. (Jela revient à préférer, à partir des systèmes élémentaires (systèmes) explicites ceux dont les compartiments et cinèses connectées sont mesurables (p. 91). Il est alors possible à partir de DICs, d'un nombre réduit d'hypothèses simples explicites et d'ajustements objectifs d'envisager une connexion en un modèle plus général. Ceci conduit :

- au développement de modèles synthétiques complexes basés sur des données (compartiments et cinèses) dont les techniques d'acquisition existent,
- au développement ou au perfectionnement de techniques d'acquisition, lorsque celles-ci sont peu efficaces ou peu fiables,
- à l'élaboration de modèles factuels en incluant des hypothèses explicites dans leurs fondements. Il s'agit évidemment de tester ces hypothèses une à une,
- à leur validation : ces modèles, factuels par excellence, permettent des prédictions vérifiables, car leurs simulations portent généralement sur des données de mêmes caractéristiques que leurs informations initiales. Si ces dernières sont des DICs, ils sont donc techniquement contrôlables dans le champ écologique.

Si au niveau élémentaire de chaque ajustement de changement d'état ou de cinèse effectivement mesuré le caractère factuel et écologique d'un modèle est directement contrôlable, la connexion de plusieurs modèles peut faire intervenir 1) des fonctions effectivement contrôlables, 2) des "lois" physiques traduisant des potentialités, dont la validité est quasi certaine mais dont l'amplitude d'occurrence dans le système écologique est inconnue, 3) des simplifications hypothétiques grossières temporairement tolérées.

Toute une stratégie de la modélisation peut en résulter dans les rares domaines écologiques où les tentatives sont assez nombreuses et diverses pour s'ouvrir aux approximations successives (ex : Bol.IN, 1981 ; RAMBAL et CORNET, 1982, ...) ; celle-ci met en oeuvre à la fois des spéculations et des faits dont des données écologiques.

6.6.4. Les modèles opérationnels

1. Modalités

Le modèle étant une représentation mimant la réalité, ce terme générique est aussi applicable aux représentations directes obtenues par exemple par les statistiques descriptives. Ces modèles de comparaison typologique décrivant "de l'extérieur" les objets-systèmes, ne seront pas pris en compte ici directement, sauf pour la transposabilité (p. 417).

Nous nous arrêterons par contre à tous les modèles qui contribuent opérationnellement à la description intrinsèque des systèmes.

On peut classer ces modèles comme produits temporaires vis-à-vis d'une activité cognitive générale de modélisation qui elle n'est pas classable car empruntant toutes les modalités possibles pour être efficace. Ces modalités peuvent être décrites en termes d'hypothèses explicites (options et propositions) en I.A. : le modèle reflète autant ces choix que le réel qu'il mime. Si les modèles reflètent ses produits, ils ne disent rien des étapes de modélisation. La diversité des voies et moyens de la modélisation permet une infinité de types de modèles, en tant que produits temporaires, et leur classement pour tenter d'en aborder l'étude peut difficilement se fonder sur les variantes de la technique, quoique celles-ci soient une contrainte considérable.

Peut-être peut-on envisager un classement des modèles en fonction :

- a) du support concret de la réalisation du modèle,
- b) du stade d'élaboration,

c) de l'objectif, entendu ici comme objectif spécifique de la modélisation. Parmi ces objectifs, on peut s'assigner d'abord un moyen 1) de surveillance ou 2) d'exploration particulière d'une des propriétés des systèmes complexes ou de mise en évidence ou 3) de carences de connaissances ou 4) d'hypothèses nouvelles (JORGENSEN, 1986).

Ces trois aspects supports, stades d'élaboration et objectifs ne sont pas indépendants.

2. le diagramme : le modèle conceptuel

Pour être entreprise, la modélisation nécessite un énoncé d'objectifs et la mise en oeuvre de moyens impliquant des concepts que l'on illustre usuellement sous forme schématique de diagrammes. Le modèle est d'abord conceptuel ; il le restera toujours sous les autres formes mais certains énoncés s'attachent d'abord aux concepts, y compris pour l'énoncé des objectifs. Tous les modèles sont conceptuels mais certains ne sont que conceptuels, c'est à ceux-là que le terme diagramme s'applique ici.

Le stade conceptuel est parfois hâtivement franchi dans la mesure où l'objectif impose une représentation simplissime du réel ou/et que les contraintes, souvent socio-économique, imposent d'"aller vite" et permettent de réunir des moyens importants. Il n'en est pas moins indispensable.

L'énoncé du modèle conceptuel, ou des aspects conceptuels des modèles, peut conduire à la recherche de méthodes graphiques, ou d'images indirectes qui sont alors considérées comme des modèles didactiques.

Le diagramme peut prendre des allures sophistiquées de représentation avec notamment les cartes, les maquettes, des figurations par infographie en quatre dimensions, (leux-ci perdent alors fréquemment leur propriété centrale dans le processus de modélisation et jouent un rôle de communication soit vers des étudiants, soit entre chercheurs, soit enfin avec le public utilisateur. Toute une symbolique peut être utilisée dans cette schématisation et peut être regardée comme une fin en soi (HT. ODIJM, 1982), notamment lorsque les entités considérées ne constituent pas entre elles un système fonctionnel mais des éléments mutuellement décrits (descriptions d'analyses multidimensionnelles). Dans ce dernier cas, la classification modélisée d'objets peut être transposée, par exemple en cartographie de ceux-ci représentés d'après leurs classes (p. 382). C'est souvent le cas en écologie finalisée où une focalisation sur l'appliqué s'impose souvent.

Le stade conceptuel perdure pendant toute la modélisation ; il est l'expression théorique des objectifs successifs de recherche.

Dans une approche séquentielle, "par dossier", on a parfois nommé prémodèle (FRONTIER, 1975) les modèles conceptuels destinés à préciser les modalités visées dans un "plan d'échantillonnage", c'est-à-dire une des formalisations de l'acquisition des données (chap. IV).

Aujourd'hui, le modèle conceptuel joue un rôle explicatif et didactique évoqué ci-dessus ; il est opérationnellement le moyen de définir les données nécessaires pour atteindre un objectif, donc d'organiser 1) les requêtes, 2) à défaut de DICs adéquates pré-existantes, les besoins d'acquisition, 3) à défaut de pouvoir préciser avec efficacité ces besoins, le moyen de définir des recherches exploratoires en microcosmes améliorant nos connaissances sur les potentialités écologiques, 4) devant l'absence de moyens d'acquisition, de hiérarchiser l'élaboration des techniques nécessaires à l'obtention de données objectives utilisables pour une modélisation écologique. Il est aussi un mode de présentation des résultats pouvant servir de base à une étape ultérieure. En fait, dans la perspective d'une Intelligence Artificielle écologique ce type de modélisation "boucle" l'état des connaissances antérieures avec la définition des options d'acquisition souhaitables. Il constitue un moyen d'explicitier l'état des connaissances et les modalités des acquisitions souhaitables.

3. Le microcosme : le modèle matériel

Longtemps la représentation des modèles au-delà des concepts et des schémas didactiques s'est concrétisée par des reconstitutions à partir d'objets matériels (physiques, chimiques et biologiques) "reproduisant" le réel : c'est l'aquarium mimant l'étang.

Par exemple, dans les sciences de la terre < <au siècle dernier un modèle était un schéma mécanique simple reproduisant les propriétés de l'objet étudié. De nos jours, de tels modèles subsistent encore dans les exposés de visco-élasticité où l'on représente les propriétés du matériau par un assemblage de ressorts à réponse élastique et de pistons huilés à réponse huileuse...> > (LIBOURY, 1985). Ce type de modèle est toujours d'un usage courant en écologie, dans de nombreux domaines où il y a transposition sur un dispositif de laboratoire, d'une perception hypothétique des systèmes écologiques réels (pédologie, microbiologie, ...).

De tels modèles concrets reproduisent une simplification de l'objet réel d'étude ; lorsqu'ils sont morphofonctionnels, ce sont des microcosmes.

Le terme microcosme désigne en langage classique un petit modèle par opposition à un macrocosme plus général. En philosophie, il désigne un petit monde (l'homme), considéré comme constituant l'abrégé du monde même !

En écologie, FORBES (1877) emploie, au fil de la plume, le mot au sens classique <<A lake... forms a Little within itself - a microcosm within which all elemental forces are at work and the play of life goes on in full, but on a so small a scale as to bring it easily within the mental grasp>> (cité par KORMONDY, 1969). Il ne s'agit en aucun cas d'une définition pour un usage spécifique en écologie mais de l'usage ordinaire d'un terme. Il n'a d'ailleurs pas été formalisé depuis en référence à un écosystème.

C'est par contre dans un sens proche des philosophes - un modèle réduit considéré comme l'abrégé d'un monde - que le terme microcosme s'utilise aujourd'hui en écologie.

Il s'agit toujours de modèles très simplifiés par rapport aux multiples variantes et aléas des systèmes réels. Parfois même la relation au réel est très floue : il s'agit alors plutôt de la reproduction de l'idée que l'on se fait du réel. Pour l'écologue travaillant dans une portion de l'écosphère, dans le macrocosme, ces réductions simplissimes ont un rôle exploratoire, parfois une fonction didactique, et permettent de tenter de tester de nouveaux moyens potentiellement dangereux avant leur usage, même limité, dans le macrocosme (particulièrement en écotoxicologie, en étude d'impacts, en estimation de risques d'accidents) (p. 480). Il est alors essentiel de valider la prédictibilité de ces microcosmes en les faisant fonctionner avec des substituts actuellement observables dans le Champ écologique.

Notons toutefois un fait fondamental : les observations effectuées dans un microcosme ne peuvent écologiquement être directement valides. Elles ne peuvent que tendre vers la validité car elles sont effectuées dans un modèle qui ne représente, dans sa conception, que les idées des concepteurs.

Les données qui y sont acquises sont des Données Expérimentales de Potentialité (DEP : p. 267) qui ne peuvent, en aucun cas se substituer aux DICs et permettre d'éviter les vérifications faites dans le champ écologique.

Par laxisme ou/et sous influence des sciences plus spécialisées qui n'ont pas pour objet d'étudier les relations globales des organismes dans leur milieu (r.e. partie du champ écologique), ce point fondamental est souvent perdu de vue. Les DEPs peuvent servir à l'élaboration d'infosystèmes non écologiques, mais ceux-ci ne portent que sur des potentialités théoriques (p. 31) : l'écovalidation demeure indispensable.

Les microcosmes réalisés dans un but de recherche écologique, tendent à simuler une portion du champ écologique tel qu'on se l'imagine (hypothèse), soit à un stade très élémentaire (ce sont des dispositifs expérimentaux) où un être vivant est

mis en contact avec un milieu totalement synthétique (produit chimique très pur, caractéristiques d'ambiance constantes, ...), soit à l'inverse de percevoir à un stade relativement global. Dans ce dernier cas, le microcosme peut être à la fois très complexe dans ses composants (par exemple l'introduction d'un sol d'origine naturel qu'aucune analyse ne saurait décrire totalement), nombreuses espèces vivantes, simulation d'un climat (malgré tout très simplifié), car l'objectif n'est pas tant de connaître les mécanismes "internes" du système mais d'obtenir une sortie du modèle (= générât) aussi proche que possible du niveau de prédiction écologique souhaité (cas des modèles d'écotoxicologie, SCHAEERER, 1983).

Dans tous les cas, ces microcosmes fournissent des résultats qui doivent être écovalidés pour avoir une signification écologique scientifiquement fondée car sinon il nous faut croire à leur validité, ce qui est anti-scientifique. En conséquence, les microcosmes ayant des conditions d'application non réfutables ne sont pas écologiques ; ils ne peuvent qu'inspirer, par une meilleure connaissance de processus potentiels, nos modèles conceptuels à tester dans le champ écologique (fig. 6-1, p. 340).

Les microcosmes jouent donc un rôle exploratoire non négligeable entre la pure écologie spéculative et l'écologie opérationnelle. Leur validation doit se pratiquer normalement par l'acquisition d'information dans le champ écologique ce qui est impossible dans l'estimation de risque à venir (croissance de pollution, nouvelles techniques, etc.). Dans ce dernier cas une approche empirique peut alors être proposée (p. 484).

4. L'infosystème : l'information sur les systèmes

Si les concepts portant sur le contenu d'un modèle peuvent être schématisés par un diagramme, utile dans la conception des protocoles d'acquisition de données, une fois celles-ci acquises l'écologue modélise mathématiquement. Une donnée n'ayant aucun sens, il travaille un ensemble de données et plus généralement des ensembles de données formant un ensemble plus vaste.

En raison, 1) de l'importance considérable que revêt la modélisation sur des données acquises, c'est-à-dire le travail de "concrétisation mathématique" des idées contenues dans le modèle conceptuel initial, 2) de sa modification au cours des nouvelles perceptions concrètes et conceptuelles que les données nous révèlent et 3) de la multitude des techniques mathématiques mises en oeuvre relativement facilement sur ordinateur, je propose de distinguer les "modèles comparatifs" des infosystèmes. Un infosystème est une représentation mathématique de la partie perçue d'un système concret, fondée sur des informations sur les composants connectés de ces systèmes. Un infosystème n'est pas un modèle uniquement descriptif (p. 99) mais se réfère à un système impliquant une compartimentalisation et une connexité des compartiments via des cinèses (p. 44, 119).

Notons que les infosystèmes utilisent nécessairement une démarche mathématique inférencielle. C'est-à-dire une démarche où les traitements mathématiques généralisent les données initialement discontinues de la globalyse au domaine d'application d'une fonction. Conjointement, une démarche est nécessaire pour décider si les ajustements sont *per se*, vrais ou faux, alors que l'ensemble des démarches des sciences exactes ne font que tendre vers le moins faux : si les mathématiques peuvent prétendre intrinsèquement à une rigueur "absolue", les infosystèmes n'auront jamais cette propriété car leur structure et leurs prédicats relèvent de choix d'expert qui ne sont pas descriptibles en algorithmes mais en heuristiques.

Au cours de cette modélisation on est conduit à un travail d'observation des propriétés des données issues de l'analyse écologique (= dépendantes d'options d'acquisition, p. 267). La reconstruction synthétique qui suit cette analyse permet la découverte de propriétés générales qui ne s'observent que dans des ensembles de plus en plus complexes. L'infosystémique révèle en outre toutes les carences des données

ou de la logique mise en oeuvre. Sans constituer en soi une étape décisive, puisqu'on l'ait tout doit être vérifié en permanence, elle constitue une étape critique particulièrement fructueuse en évacuant le discours incontrôlable et en mettant les faits (et l'ignorance) à nu.

Les propriétés issues des Données Initiales Contrôlées (DICs), fréquemment sous forme de simples fonctions au stade opérationnel élémentaire, résument l'information par une description nouvelle en Données Secondaires Elaborées (DSEs). La réduction de l'information des DICs en DSEs ne se fait normalement pas sans perte d'information. La "loi" mathématique décrite par des DSEs n'est pas le reflet de l'information totale des DICs ; il y a "simplification" par condensation mais aussi par perte des particularités de DICs "aberrantes" par rapport à la loi mathématique retenue. On dit que la formule mathématique est plus ou moins bien ajustée aux données. Elle révèle aussi, par contraste, la nécessité de prendre en compte ultérieurement des propriétés qui pourraient expliquer les données "mal ajustées".

Le jugement sur la qualité d'un ajustement est donc une appréciation sur la qualité de l'infosystème ; il vise à minimiser la perte d'informations au cours de la synthèse.

La modélisation implique une généralisation - c'est-à-dire au moins une interpolation entre données observées (DICs). Le modèle élémentaire tel $y = f(x)$ part des y_0 (DICs observées) liées à chaque x_0 (DICs) pour établir une fonction aussi proche que possible des y_1 de telle sorte que pour chaque x_0 , y_1 (valeur calculée par le modèle) soit proche de y_0 . Mais la forme $y = f(x)$ permet aussi de calculer tout y_i pour tout x_i : il y a interpolation entre les x_0 , voire extrapolation au delà du domaine des x_0 (fig. 6-2, p. 347). Une telle fonction unissant des données à un tout décrit un système ; niveau élémentaire de la synthèse systémique (p. 91). Les motivations poussant à développer un infosystème sont souvent nombreuses et complexes ; elles peuvent être d'après Samih (1988) :

- 1) la détection des propriétés des ensembles étudiés,
- 2) la réduction des données (synthèse),
- 3) l'estimation de un ou plusieurs paramètres,
- 4) la visualisation de valeurs interpolées,
- 5) la prévision de l'évolution du système,
- 6) la commande d'un système, c'est-à-dire prévoir son comportement sous une action définie.

D'une façon générale, les traitements mathématiques débutent par une tablation d'ensembles puis, par des ajustements (calibration de paramètres), ensuite par des connexions de fonctions mathématiques entre elles, puis organisent des modèles de plus en plus complexes.

6.6.5. La synthèse écosystémique

1. Modèles à compartiments et synthèse

Considérons un compartiment par rapport au champ écologique de l'écosphère, c'est-à-dire aux trois référendaires.

On peut considérer les éléments d'un compartiment quelconque pour ses états (données instantanées le décrivant), ses entrées et sorties, ou cinèses entrantes et sortantes, à cet instant (dérivées du temps). Ces éléments portent sur sa composition et les cinèses modifiant "instantanément" cette composition.

On peut aussi considérer ce compartiment par rapport à l'espace, telle la trajectoire d'un oiseau ou le déplacement d'un nuage d'aérosol ; il a sa mobilité.

On peut enfin le considérer en fonction du temps. La composition du compartiment à un temps-lieu donné dépend de sa composition juste antérieure (= innéats) et des cinèses (modifiant l'état) et mobilité (modifiant l'espace-temps)

intervenues entre cet état juste antérieur (t_0) et celui considéré ($t_0 + \epsilon$) (fig. 1-12, p. 99).

En raison du fait que toute représentation est en pratique basée sur des données discontinues (p. 291), il est possible d'adopter une représentation compartimentale par rapport à toute situation ; c'est-à-dire une représentation des états et cinèses instantanés en fonction des trois référendaires : composition, temps, espace. L'infosystémique écologique portera fondamentalement sur ces modèles spatiotemporels à compartiments.

Toute portion de l'écosphère pouvant être un compartiment, l'infosystémique Spatiotemporelle Ecologique à Compartiments (ISTEC) permet la synthèse de toutes les informations que nous avons sur cette écosphère par connexion des composants (compartiments + cinèses) versus les trois référendaires écologiques. Cette synthèse, ne signifiant pas le global (p. 41), devra être contrôlée par rapport au niveau d'observation qu'elle décrit, cas par cas, portion d'espace par portion, date par date, élément de composition par élément de composition.

En pratique, les compartiments doivent être choisis en fonction de notre aptitude effective à les identifier, à les mesurer et à les délimiter. On peut certes conceptuellement imaginer (ou souhaiter mesurer) des compartiments plus nombreux, ou délimités différemment, mais il est opérationnellement nécessaire de choisir des compartiments identifiables si l'on veut aboutir à un ISTEC.

Les modèles à compartiments permettent la synthèse de modèles mathématiques plus simples, et notamment de fonctions mathématiques qui traduisent de façon élémentaire des changements d'état ou/et de cinèses.

On pourra alors reconnaître classiquement (fig. 6-12)

- 1) Les dynamiques d'évolution de la taille et du contenu du ou des compartiments considérés (changements d'état = transformations, p. 46).
- 2) Les cinèses instantanées (débits) d'échanges de ce compartiment (entrée et sortie).
- 3) Les variables d'ambiance (exnéats) régulant, le modèle. Ces variables peuvent être analysées en termes de variables d'entrée, variables d'état ou de cinèse, mais sont souvent étudiées à part par commodité.

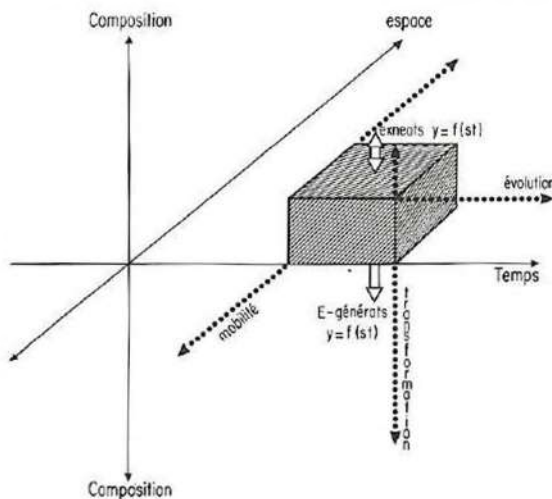


Figure 6-12 - Un compartiment écologique se transforme à chaque instant par ses exnéats et E-générateurs et peut être en mouvement (mobilité) par rapport à l'espace euclidien terrestre, de sorte que son évolution (transformation observée en fonction du temps) est notable.

En effet, fréquemment des conventions techniques limitent le rôle du modèle. Par exemple, par commodité, il n'est pas tenu compte directement du cumul

thermique du compartiment (fonction de sa capacité thermique), ni des échanges thermiques (entrée et sortie) conduisant à son changement de température (état). Plus brièvement, on considère l'état thermique comme facteur régulant l'activité biophysicochimique du compartiment sans chercher à expliquer les mécanismes des changements thermiques.

D'un point de vue physique, une "variable d'ambiance" est un état régulé par des entrées-sorties, non prises en compte dans le modèle, mais introduit seulement comme état "facteur" ; il s'agit d'une commodité systémique non strictement objective. Par exemple, la température d'un ver de terre est à chaque instant le bilan de son catabolisme (exergonique) et de la diffusion qui en résulte. Il est plus simple de ne pas étudier ces éléments mais de mesurer directement l'état résultant de ces échanges (RANC, 1980).

La mise au point d'un ISTECS se fait par ajustement de fonctions sur des données servant à son élaboration initiale (= calibration) puis ce modèle (déterministe ou probabiliste) est utilisé à des fins de simulation et de validation.

Un modèle à compartiments nécessite pour simulation 3 types de variables (DICs ou DSEs) : les variables d'état initiales des compartiments introduites en début de simulation (— innéats), les variables externes qui sont de deux types : les variables d'ambiance (parfois hydriques, souvent thermiques : régulation des cinétiques réactionnelles) et les variables d'entrée (= cinèses d'entrée) externes au modèle (non contrôlées par lui) mais dont le fonctionnement dépend (flux lumineux, disponibilité en aliments, en eau, etc.).

Un modèle porte enfin sur un objet concrètement limité, c'est-à-dire un niveau de globalyse explicitement précisé (coordonnées euclidiennes, pas de temps, structure c'est-à-dire nature des variables en cause). Tout modèle peut être regardé comme un sous-modèle ou réciproquement chaque partie du modèle (= sous-modèle) peut être regardée comme un modèle *per se* en vertu de la hiérarchie systémique des niveaux d'étude dans la globalyse (p. 94).

Les infosystèmes peuvent être parfaitement corrects quant à leur réalisation mathématique, tout à fait aberrants dans leur conception écologique, et fallacieux quant à leurs données.

In fine, en écologie, ces modèles devant se référer au Champ écologique à partir de DICs et devant se prêter à une écovalidation dans celui-ci d'une part, et la hiérarchie systémique de tels modèles pouvant couvrir tout le domaine écologique depuis l'écosphère jusqu'à l'étude fine d'un syntégron d'autre part, nous allons détailler quelques exemples et propriétés des ISTECS (Infosystèmes Spatiotemporels Ecologiques à Compartiments).

2. Infosystèmes et ISTECS

Tous les systèmes du champ écologique (p. 35) peuvent être représentés partiellement par des ISTECS, où les états décrivent les compartiments et les cinèses mesurent les échanges spatiotemporels. Mais tous les infosystèmes à compartiments ne se rapportent pas au champ écologique ; ils peuvent par exemple représenter une compartimentalisation parfaitement arbitraire d'un dispositif artificiel. Ces derniers infosystèmes fondés sur des DEPs (Données Expérimentales de Potentialité) sont des infosystèmes dérivant de données de microcosmes (p. 400), c'est-à-dire de modèles de modèles hypothétiques potentiellement utilisables. Ces études de potentialité par infosystème à compartiments ne peuvent être confrontées au champ écologique auquel elles sont étrangères, mais peuvent orienter les opinions d'expert. 11 s'agit d'infosystèmes non écovalidables : ce ne sont pas des ISTECS.

Seuls les ISTECS, construits directement ou indirectement à partir de DICs, constitueront la modélisation des systèmes écologiques à la fois sous leur forme (ou structure) et leur organisation fonctionnelle. Comme tout modèle, ces ISTECS sont limités à un domaine du champ écologique et dépendent donc de variables externes ;

ils simulent des résultats qui expriment non la synthèse elle-même mais ses conséquences opérationnelles sous forme de sorties. Pour être opérationnelles, ces sorties, situées à un niveau $n + 1$ par rapport aux DICs initiales (n), doivent pouvoir être réfutées par rapport au niveau de globalyse $n + 1$ par une confrontation aux DICs de ce niveau (fig. 1-3, p. 40). La réfutation de l'ISTEC est son écovalidation.

Le modèle est nécessairement à compartiments, même si il est "réduit" à une seule variable d'état ou cinèse dans un ajustement mathématique ; il n'est alors plus apparemment décrit en termes de compartiments. Ces compartiments "fonctionnent" dans l'espace-temps. Très souvent le modèle mathématique sera un groupe d'équations en "fonction du temps" ; mais cette écriture reflète nécessairement des transferts spatiaux, un changement d'état implique au moins une cinèse et, réciproquement, une cinèse implique un transfert spatial : il ne s'agit donc là encore que d'une simplification d'écriture.

Toutefois ce fonctionnement temporospatial est associé au système modélisé, lui-même connectable avec son entour. Cette connexité ne doit pas être confondue opérationnellement avec la transposition du modèle, c'est-à-dire son application à des situations spatiotemporellement différentes sans nécessaire connexion entre ces situations (voir ci-dessous). En d'autres termes, il ne faut pas confondre le fonctionnement objectif d'une simulation locale avec l'aptitude technique de réutiliser le même modèle en d'autres circonstances locales.

D'après JORGENSEN, un modèle, dans sa forme mathématique, comporte 5 domaines ("components") : les variables externes, les variables d'état, les fonctions mathématiques, les paramètres et les constantes universelles. Cette description reflète le point de vue de l'élaboration mathématique classique. Ces domaines du modèle découlent de l'objectif que l'on s'assigne et doivent être reconsidérés dans le cadre de la modélisation écologique totale d'une part, et d'autre part, appréciés en fonction des analogies, voire homologies, avec les systèmes écologiques réels que l'écologue décrit.

Pour un tel objectif, le modèle est limité dans l'espace, le temps et sa composition. Sa composition ne porte que sur certaines caractéristiques : par exemple les états et cinèses des corps azotés dans une portion d'holocénose dont on cherche à étudier les mécanismes d'échange de cet élément chimique ; autre exemple, les modifications d'état des diverses classes d'âges et les taux de recrutement/perte de chacune, dans un modèle démographique monospécifique, etc.

L'objet du modèle étant défini, on peut alors reconnaître : 1) les variables externes, correspondant aux exnéats, 2) les variables initiales correspondant aux innéats, 3) les variables internes, 4) les fonctions mathématiques liant les variables internes dont 5) les paramètres des fonctions calibrées par ajustements, 6) les constantes universelles (liées aux lois physiques), 7) les simulations, ou sorties du modèle soumises à validation.

Les variables externes sont des exnéats qui sont l'expression des entrées de matière-énergie dans le système. Elles peuvent par simplification être considérées comme des variables d'ambiance (telle la température dont on néglige les débits thermiques, cf. ci-dessus). On peut par spécialisation d'expression, les regarder comme des "fonctions de commande", des forces appliquées, ou des fonctions conductrices ("forcing functions, driving forces," etc.).

Les variables initiales sont les composants du système à l'espace-temps "0".

Les variables internes sont l'état du système à tout espace-temps suivant, ou égal à, 0. Elles sont souvent appelées improprement variables d'états mais comportent aussi des cinèses : elles portent sur les composants du modèle.

Les fonctions mathématiques sont la formalisation des relations entre composants du modèle. Elles peuvent être pragmatiques, par la recherche de la meilleure fonction traduisant une succession de simulations adéquates du modèle, mais peuvent aussi être choisies pour traduire des propriétés explicatives du système.

Les paramètres résultent du calcul des "meilleurs" ajustements aux variables externes, initiales et internes du modèle. Cette calibration des paramètres liée au choix des fonctions tend à la vérification de la logique interne du modèle (JORGENSEN, 1986) ; en résultent ultérieurement les constantes et lois universelles.

Les validations sont la recherche de l'accord entre une prédiction (prognose) par simulation du modèle et un processus effectivement observé après cette prédiction. Vis-à-vis de la réalité écologique, il s'agit d'une écovalidation.

3. Modélisation par ISTEK

Pour être opérationnelle, la modélisation est limitée initialement à une problématique précisée par un objectif concret. Dans cette limite, il faut explorer les DICs disponibles pour définir les compartiments et cinèses pouvant recevoir des informations objectives disponibles sur requêtes (p. 317) ou par acquisition, (p. 263). Par exemple, dans le modèle REAL (Rôle Ecologique et Agronomique des Lombriciens), l'objectif de synthétiser le rôle des lombriciens a dû être limité à un nombre très restreint de compartiments et cinèses (fig. 6-13), dont certains d'ailleurs présupposaient encore des développements techniques au moment (1973) de la définition conceptuelle des compartiments du modèle.

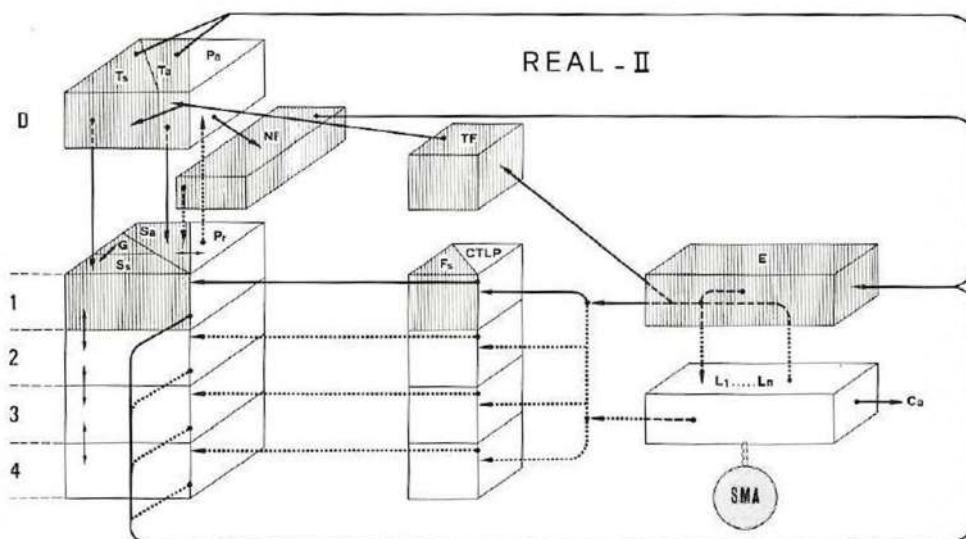


Figure 6-13 - Deuxième diagramme du modèle du Rôle Ecologique et Agronomique des Lombriciens. Le transit intestinal de l'endotère (E) des lombriciens (L) ainsi que leur ingestion, assimilation, émanation, dépend d'un sous-modèle d'activité (SMA) et conduit à des rejets de lurricules frais (TF), de fèces endogées (Fs) et d'un compartiment de transfert d'éléments lombriciens-plantes (CTLP) vers les parties racinaires (Pr) puis aériennes (Pa) végétales. Les fèces s'incorporent dans le sol "assimilable" (Sa) ou "stable" (Ss) et les lurricules comportent aussi une fraction "assimilable" et "stable" (Ta et Ts). Les lombriciens ingèrent du sol, des lurricules, de la nécromasse-Zihère (NI) issue de Pa et sont consommés par des carnivores (C'a).

On peut en effet privilégier certains objectifs au nombre desquels trois d'entre eux :

1) la formalisation/condensation de l'information. On privilégie ici le choix d'ensembles pertinents dans la compartimentalisation et la qualité du résumé pour obtenir un résultat précis et succinct. Cette condensation se faisant, par exemple, sous forme d'un dessin, d'une carte ou d'une formule mathématique ; elle privilégie usuellement d'abord un seul type de caractéristiques, telles celles du cycle de l'azote (et non des autres éléments, pourtant associés dans les composés organiques) ;

2) l'étude des propriétés des données relatives aux composants, avec ajustements et connexions variés résultant de l'infosystémique, pour découvrir, dans une masse parfois importante, des propriétés préalablement inconnues ;

3) la transposition. On cherche, à partir d'une première réalisation d'un modèle, à conserver sa structure (connexions + calibrations) pour l'appliquer ailleurs. Après cette trans-position, on lui fournit pour tout ou partie de nouvelles données (variables initiales, d'ambiance et d'entrée) afin d'obtenir de nouveaux résultats. Ici les résultats reflètent une synthèse transposant le modèle d'une situation du champ écologique à une autre en faisant donc une prédiction, à partir des connaissances acquises dans une Situation A, sur les propriétés de la situation B. La prédiction ne porte pas que sur des données simulées mais sur l'adéquation des fonctions, des constantes de la compartimentalisation, voire de certains paramètres calibrés du modèle A à son application en B. On suppose le modèle suffisamment général pour s'appliquer de A à B ce qui sous-entend que fondamentalement les situations A et B ont une certaine identité.

On privilégie alors des choix dans la modélisation, pas trop particuliers pour permettre de transposer le modèle de A sur B. Par exemple, dans REAL (fig. 6-13), le modèle est conçu pour "tout m²" (= référendaire espace), les actes, innés et mésonnés non climatiques sont considérés comme ayant joué antérieurement (état du peuplement lombricien) ; les variables d'ambiance (température, humidité, photopériode) sont traitées dans un sous-modèle régulant l'"activité" du modèle.

Au cours de la modélisation, pour accroître l'efficacité de l'infosystème, on peut faire des choix en faveur de la transposabilité du modèle ; ces choix peuvent être en contradiction avec une grande précision. Les variables externes (entrées + ambiance) s'appliquent aux infosystèmes au cours de leur fonctionnement dans le champ écologique généralement en fonction du temps, tandis que le changement d'innés (composants d'état initiaux), c'est-à-dire de variables internes, permettent la transposition euclidienne (dans l'espace).

De cette façon le modèle est regardé comme un "moteur à prédiction" (inférence). Les innés déterminant sa structure initiale (sa composition) celui-ci peut être déplacé dans deux référendaires du champ écologique : l'espace, grâce à sa transposabilité sur des systèmes identiques, ou/et le temps.

Les trois objectifs, décrits ci-dessus, ne s'excluent pas l'un l'autre mais peuvent être en partie antinomiques. Dans le premier cas, la précision des résultats, uniquement visée, peut être exigée ; le dernier cas privilégie la transposabilité.

Par exemple, pour REAL, sans renoncer totalement aux objectifs de formalisation et d'étude des propriétés, la transposabilité a été et est encore privilégiée pour rendre utilisable ce modèle dans les divers contextes agronomiques et environnementaux des milieux où les lombriciens jouent un rôle essentiel (fig. 6-16, p. 41 1). L'explicitation de ses conditions d'applications (transpositions) étant, peu à peu, décrite dans le Système-Expert ROLUMBRIC (p. 431).

Les objectifs étant définis, la modélisation en infosystème peut être envisagée, si les DIGs adéquates sont disponibles. Par exemple, pour REAL, des estimations de populations lombriciennes préexistaient (compartiments L), ainsi que les données d'ambiance permettant la réalisation d'un Sous-Modèle d'Activité (SMA). Les données ne préexistent pas toujours, de sorte que la modélisation conceptuelle pour un ISTEC peut révéler la nécessité de développements techniques ou d'acquisition de données (cas des débits d'azote pour le modèle REAL, cf. cinèse isotopique, p. 149, 274).

Les étapes du développement d'un ISTEK se feront par

- a) élaboration d'un modèle conceptuel à compartiments fondé sur des données potentiellement disponibles (ou susceptibles d'être acquises dans un délai raisonnable),
- b) assemblage des DICs nécessaires, notamment par exploitation d'une Base de Données Relationnelle, puis formatage,
- c) choix du modèle mathématique,
- d) ajustement des ensembles de données créés à des fonctions mathématiques (prédicats) permettant de résumer l'information us un systèmon (identification mathématique),
- e) connexion des premiers ajustements en infosystèmes plus complexes (— de niveau d'intégration supérieur),
- f) explication heuristique des choix.

Les connexions prennent donc en compte des sous-modèles infosystémiques préalables. La modélisation en ISTEK porte ainsi sur des domaines de plus en plus étendus, par connexion de modèles élémentaires en modèles plus complexes. Par rapport au champ écologique, il y a interprétations hiérarchisées par production d'étapes intermédiaires, qui sont autant de synthèses partielles.

Un modèle transposable conserve ses structures fonctionnelles mais s'adapte aux situations locales. Cette transposabilité sera d'autant plus grande que la transposition se fait en fonction de milieux identifiés comme semblables (p. 374) ou se fait par interpolation entre sites concrètement étudiés à partir d'un choix multivarié (p. 380). On peut également s'appuyer sur les structures biologiques répétitives, bio-indiquant par catégorie écologique (p. 245), un degré de similitude fonctionnelle dans les milieux. En pratique, les moyens informatiques disponibles donnent à l'écologie une infinité de moyens d'effectuer des opérations d'interpolation de façon de plus en plus satisfaisante et surtout explicitée en I.A..

Il est important de souligner que la modélisation est un travail qui peut constamment être repris et corrigé soit par l'apport de nouvelles DICs, à 1 ou n ensembles constitutifs d'un modèle, soit par modification des connexions du modèle lui-même, soit par l'adoption de nouveaux ajustements mathématiques plus précis.

4. Structuration des infosystèmes

Les modèles numériques ont diverses propriétés importantes. Rappelons que leurs valeurs peuvent être traduites selon la formulation élémentaire d'état (i) et cinèses d'entrée (kij) ou sortie (kji) (fig. 6-14).

L'équation associée à ce compartiment est

$$dx_i / dt = - [Z k_{i,j}] x_i + \sum_{j=i} E k_{j,i}$$

(kij : constante de vitesse des échanges entre le ième compartiment et le jème compartiment).

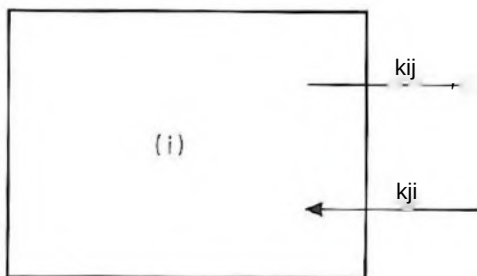


Figure 6-14 - Représentation générale d'un compartiment et des cinèses associées dans un système quelconque (d'après Pave, 1982).

Le système est réversible dans la composition (à l'exergonie thermodynamique globale près, toujours négative) et est irréversible pour les réactions exergoniques et le temps.

Les compartiments débouchent nécessairement sur un autre compartiment qui peut être leur entour dans le cas d'un système simplissime. Plus généralement on privilégie deux ou n compartiments qui constituent un sous-système lui-même globalement lié par connexion à son entour.

En considérant un système plus complexe, il y a toujours caténation (= enchaînement de connexions) de compartiments et concaténation entre chaînes de compartiments.

D'autre part, tout système est un sous-système de son entour (sur-système), où tout compartiment peut être décomposé en sous-système.

La connexité est la propriété des systèmes à compartiments à avoir des échanges (= cinèses) tels que tout compartiment peut être connecté à tout autre compartiment, mais pas inversement, car il y a dans tout ISTEK des échanges énergétiques exergoniques globalement irréversibles : les cinèses sont orientées.

D'un point de vue opérationnel, et notamment appliqué, on peut chercher à modifier tout ou partie d'un système par un acte, dit "commande" (par exemple, traitement pesticide sur n compartiments d'un agro-écosystème). La commande (acte) appliquée sur le compartiment (X) modifie la sortie y en tant qu'effet de la cause (acte). Un compartiment est commandable s'il est modifié directement, ou indirectement, via le système, par un acte (par exemple, la croissance d'une proie (x) aux temps $L_j \dots t_n$, après élimination des prédateurs (y_j, y_2, Y_3, Y_n) de cette proie par l'acte pesticide : exnéat a_j au temps $t^{\wedge}$) (fig. 6-15).

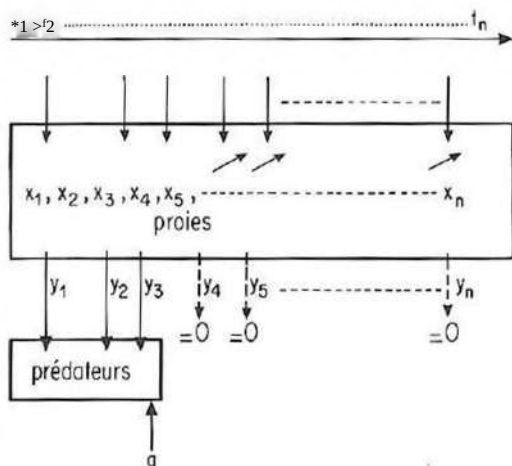


Figure 6-15 - Exemple caricatural de commandes : éradication de prédateurs consommant les proies par l'acte, a au temps $t_j - t_4$ et réponse ultérieure du compartiment x et de la cinèse y .

On dit qu'un système (ou compartiment) est observable si l'on peut déduire ses états à partir de la connaissance des variables d'entrée (innéats + exnéats).

On dit qu'un système (ou compartiment) est identifiable s'il est complètement commandable, observable et si l'on peut estimer les paramètres k_{ij} de ce système à partir de nouvelles données. Cela conduit à introduire de nouvelles données pour réfuter les prédictions du modèle ; ceci est notamment rendu possible par transposition. L'identification nécessite la mise en évidence des variables sensibles pour caractériser le(s) phénomène(s) étudié(s). L'identification se fait, via le modèle, par des appréciations d'ajustements de variables au(x) infosystème(s) afin d'optimiser l'usage des données, voire leur exploitation ou acquisition (Vil.A, 1982). La

structuration de modèles à compartiments linéaires, uniquement compositionnels, a été clairement exposée par Pave (1982).

Les caténations et concaténations des compartiments en fonction des trois référendaires (composition, espace et temps) conduisent à faire des connexions de plus en plus complexes (agrégations) qui peuvent être contrôlées étape par étape. Toutefois opérationnellement chaque compartiment choisi est toujours un complexe qui pourrait être subdivisé (p. 105). A un certain niveau d'observation, on prend le risque d'une erreur induite par son caractère complexe (par le fait qu'il est lui-même un agrégat).

Des études théoriques sur les risques pris sur de telles agrégations ont été conduites et permettent de connaître la part de risques encourue par de tels choix dans les modèles de cycles d'éléments à compartiments ayant des débits variant de 1 à 3 (dans une agrégation n'entraînant qu'une erreur d'estimation inférieure à 10 %, GARDNER *et al.*, 1982). L'étude théorique de ce type d'erreur peut être étendue à un grand nombre de modèles (CALE *et al.*, 1983). Par ailleurs, dans une certaine mesure, la complexité d'un compartiment peut être révélée par la fonction mathématique d'ajustement reflétant la nature multiple du compartiment concret retenu (SAMIH, 1988).

5. Simplifications (= référendaires négligés)

Dans la pratique, la modélisation peut être conçue conceptuellement par des diagrammes (fig. 1-12, p. 99, 6-13, p. 406), prenant en compte les trois référendaires (composition, espace, temps), mais l'infosystemique ne porte que sur les données disponibles pour chaque compartiment, cinèse et situation spatiotemporelle. Il est alors fréquent de ne représenter un ISTEAC que par certaines de ces propriétés.

Lebreton et MILLIER (1982) donnent à cet égard un *vademecum* très pratique où les modèles sont d'abord envisagés à partir de compartiments évoluant essentiellement en fonction du temps de façon continue (dynamiques définies par des équations différentielles) ou discontinue (dynamiques définies par des équations récurrentes) ou en fonction de la transformation temporelle de la composition des compartiments (modèles à compartiments compositionnels), ou encore de la modification temporelle des compartiments (modèles de diffusion), ou enfin la modélisation de la réponse d'un compartiment à une cause externe (exnéat — commande) (courbes de réponses). Toutes ces démarches se font en négligeant 1 ou 2 référendaires et en différant donc l'étude de ceux-ci.

Ainsi, par exemple, le modèle REAL est conçu pour la simulation de certains éléments de compartiments du sol en fonction du temps. La prise en compte des exnéats est réduite à des mésoneats d'ambiance majeurs (température, humidité, photopériode). Les actes et l'hétérogénéité spatiale ne sont pris en compte que par la transposition du modèle sur de nouvelles données locales d'état initial des compartiments du système (innéats) reflétant, par exemple, le niveau "naturel" d'une population ou son état après un acte agrotechnique. Cette transposabilité du modèle (fig. 6-16) permet la prise en compte par les innéats (= variables initiales) des causes antérieures (autres mésoneats + actes) conduisant à l'état du peuplement en début de simulation. C'est la transposition qui permet "dans et hors de l'infosystème" la prise en compte des trois référendaires.

6. Ajustements

A. Objet des ajustements

Les modèles à compartiments peuvent être des systèmes complexes mais ils doivent être réductibles aux variables étudiées dans l'analyse écologique de la portion du champ écologique observé (— globalyse). Elémentairement (c'est-à-dire sur une matrice entités x critères, en fonction de l'espace-temps (st)), les données peuvent être décrites en fonctions mathématiques, souvent exprimées seulement en fonction du temps et traduisant l'évolution d'une variable considérée ayant trait au référendaire composition de la systémique.

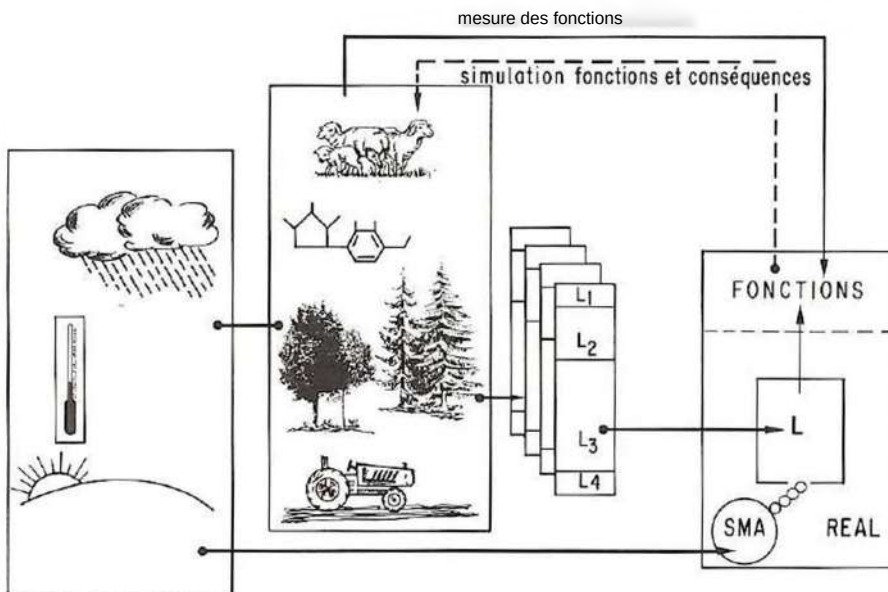


Figure 6-16 - Transposabilité du modèle REAL (voir fig. 6-13, p. 106). La simulation dépend 1) de la structure du peuplement lombricien, L_j , L_g , ... L_n résultant de la fertilité et gestion de l'espace, et 2) des conditions mésologiques : photopériode, humidité et température du sol, ajustées par le sous-modèle d'activité (SMA). Le modèle est transposable sur tout point de l'espace où ces informations objectives FDICsJ sont acquises.

Les fonctions mathématiques élémentaires portent sur des objets de nature différente qui analytiquement décrivent la modification quantitative d'une caractéristique d'un compartiment ou/et de leurs cinèses entre compartiments.

Synthétiser c'est notamment résumer, si possible, l'essentiel de ces modifications. Les données sont donc traitées de manière à sortir leurs traits pertinents en un nombre restreint de fonctions mathématiques. Un ajustement mathématique élémentaire traduit donc le changement d'un compartiment observé comme résultant d'échanges avec son entour : ces fonctions de changements es temps et espace s'adressent toujours au système élémentaire (systèmeon, p. 91) à deux compartiments <objet central, entour> et à leurs cinèses (fig. 6-14, p. 408). Les ajustements élémentaires miment donc sur des systèmeons repérables dans les trois référentiels du champ écologique. Ce caractère élémentaire est essentiel comme élément-base de toute synthèse systémique.

Alors que l'étude descriptive des objets écologiques (p. 367) aborde le maximum de variables descriptives possibles pour une typologie d'autant plus objective qu'elle décrit les propriétés externes des systèmes, la systémique aborde composant par composant les éléments des systèmes : la modélisation va du particulier au général, la typologie du général au particulier. L'ajustement est l'élément de base de toute synthèse systémique. Il s'agit là, en écologie, d'une opposition opérationnelle entre les deux PRACs (Processus Répétitifs d'Accroissement des Connaissances).

B. Qualités des ajustements

La qualité d'un ajustement sera d'autant plus grande que le modèle reproduit fidèlement le mimé. L'écart entre une série de valeurs initiales servant à ajuster un modèle et les données produites par simulation dépend du choix du prédicat (fonction

mathématique) et de la qualité de l'ajustement des paramètres de la fonction mise en oeuvre. L'analogie, plus ou moins grande entre les deux séries (initiales et simulées), est la similitude.

Une deuxième qualité porte sur la valeur explicative de la formule-interprétation dégagée pour résumer l'information. Il ne suffit pas, par exemple, de faire passer tous les points par une courbe (la fonction polynomiale est alors parfaite) mais il faut aussi que le prédicat soit simultanément interprétable par l'expert comme phénomène biophysicochimique et comme fonction mathématique homologue de ce phénomène. C'est la signification du modèle ou sa valeur explicative.

La signification est appréciée par l'expert qui peut l'améliorer par le choix de prédicats (fonctions) plus adéquats aux phénomènes décrits par les données tandis que la similitude peut être mathématiquement appréciée par simulation (écart entre réel et prédit) et porte globalement sur la pertinence de la fonction choisie et sur la qualité de la calibration des paramètres : la similitude pourra être bonne avec une valeur explicative mauvaise (cas de la fonction polynomiale) ou inversement médiocre mais explicative dans le contexte des préoccupations de la recherche.

Le choix d'un modèle ayant une bonne signification est donc une étape décisive et délicate.

Par ailleurs, au plan mathématique, le risque est grand pour améliorer la similitude d'accroître le nombre de paramètres. D'une façon plus générale, plus ce nombre est grand, plus l'ajustement se rapprochera des valeurs initiales mais moins l'information est résumée et donc plus la signification des paramètres devient faible ; un rapport -nombre de paramètres/nombre de valeurs initiales - faible est souhaitable.

Toutefois, la signification du modèle peut conduire à des choix inverses ; on peut dans certains cas connaître par des études antérieures la nature de la fonction imposant un nombre de paramètres et disposer d'un nombre faible de valeurs, dans ce cas justifié par des raisons extrinsèques à l'ajustement, le calcul des paramètres est possible si leur nombre est toutefois plus petit que celui des valeurs initiales.

Heureusement, sous une grande diversité apparente, les lois physicochimiques régissant la matière (p. 52) limitent fortement la variété des fonctions explicatives élémentaires (dont celles vitales). Nous allons décrire succinctement les principales fonctions écologiques présentées selon leur phénoménologie, utile à l'écologue, accompagnées de leurs modèles mathématiques, utiles en techniques d'ajustement. Dans l'objectif d'une écologie opérationnelle, il est indispensable de comprendre la signification des fonctions. De nombreux ouvrages spécialisés sont consacrés à ce domaine. Soulignons toutefois la généralité de l'importance des fonctions à base exponentielle, liée aux propriétés fondamentales de la matière et des réactions dans les systèmes écologiques respectant la règle de Van't Hoff et très généralement (sauf homéothermie) la formule d'Arrhénius (p. 69).

C. Composants à cinèse autofreinée

C'est un étal d'un compartiment fonction de la concentration d'un élément qui diminue dans ce compartiment.

Par observation directe de cette diminution, la fonction est du type :

$$(1) \quad y = a - \exp^{kx}, \text{ où } y \text{ est l'élément et } x \text{ le temps (ou l'espace-temps).}$$

C'est le cas d'un compartiment se vidant en fonction de la concentration d'un élément non renouvelé, telle la vidange d'un réservoir, tel un élément dans un compartiment traversé d'un débit constant diluant cet élément qui est éliminé d'autant moins vite à la sortie qu'il est moins fréquent dans la composition du compartiment. C'est aussi le cas de la formation d'un produit AX dépendant de la concentration de A, non renouvelée.

AX épuise A dans le compartimentée sa concentration prend la forme

$$(2) \quad y = K - (a - \exp^{kx})$$

où la valeur K atteinte à l'infini marque l'épuisement total de l'élément formateur A.

Il s'agit de réactions autofreinées. Les deux équations peuvent cohabiter, l'élément A est décrit par l'équation (1) et AX par l'équation (2).

Il est à noter que la dérivée à l'origine donne la vitesse maximale lorsque tous les éléments A sont disponibles, pour une réaction AX par exemple.

D. Composants à cinèse auto-accélérée

Il s'agit de tous les processus qui dépendent des "produits" de ces processus (activation dépendante, autocatalytique). Par exemple, (1) en conditions illimitées de produits réactifs, une réaction exergonique s'auto-accélère en fonction de la température que cette réaction dégage ; (2) une population, sans limitation nutritionnelle et sans antagonistes notables, a une croissance démographique fonction du niveau même des reproducteurs produits par la population. C'est le cas des êtres vivants en général et particulièrement des groupes ayant développé une adaptation démographique de type prolifique (= r) se trouvant accidentellement en situation non limitante. Il s'agit de phénomènes galopants, explosifs, pouvant être présentés selon une forme positive de croissance ou négative (figurant par exemple la chute accélérée d'un corps dans le vide).

$$(3) \quad y = b + \exp^{kx} \text{ (fig. 6-17)}$$

Ces fonctions sont accélérées par leur(s) produit(s), soit par augmentation cumulative d'énergie (probabilité réactionnelle par agitation thermique, énergie cinétique d'une chute, ...), soit par augmentation de la quantité de catalyseur (évitant un accroissement énergétique) (réactions auto-catalytiques, accroissement au cours des générations de la masse de géniteurs issus de la génération précédente, ces géniteurs étant d'ailleurs des systèmes autocatalytiques intégrés).

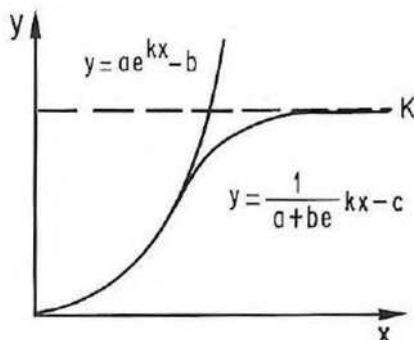


Figure 6-17 - Les fonctions exponentielles et logistiques interviennent souvent dans les ajustements.

E. Autoaccélération limitée par le milieu

L'application aux populations humaines des phénomènes d'autoaccélération démographique conduit aux famines selon MALTHUS (1804) (voir équation (3) ci-dessus). Une réflexion plus fine sur la capacité démographique du Royaume de Belgique a conduit VERHULST (1838) à combiner une loi d'auto-accélération avec une loi autofreinée qui a reçu le nom de fonction logistique

$$(4) \quad y = 1 / (c + d \exp^{kx}) \text{ (fig. 6-17)}$$

Cette loi traduit dans un premier temps la propension d'un phénomène à s'auto-accélérer (au plan démographique la population ne dépend que du nombre de reproducteurs : autocatalyse) mais cette réaction est également dépendante de produits disponibles dans un compartiment clos (initialement la nourriture annuellement disponible en Belgique) de sorte qu'il y a autofreinage de la réaction.

Cette loi logistique a une grande importance pratique dans un certain nombre d'expériences où les manipulations tendent à créer brutalement des apports dans un compartiment suivi de son épuisement relatif progressif. Elle a un rôle important également dans toute situation de fluctuations plus ou moins brutales des caractéristiques compartimentales (aléatoire, saisonnière, ...).

F. Autoaccélération balancée : cinèses constantes

11 n'est pas rare dans un laps de temps et d'espace assez court, ou encore dans des milieux relativement stables ou stabilisés, que les compartiments fluctuent fort peu. 11 est également beaucoup plus fréquent que les compartiments se caractérisent par des entrées et sorties s'équilibrant de sorte que l'état du compartiment ne change que régulièrement selon une fonction linéaire $y = a + kx$.

Si le compartiment est métabolique, il n'en est pas moins lié à son entour par des cinèses. L'information sur les cinèses peut être obtenue directement par interception ou indirectement par marquage (p. 273).

G. Calibration des paramètres

La fonction étant choisie, on optimise globalement le modèle par calibration des paramètres choisis pour réduire l'écart qu'il y a entre données initiales et données simulées homologues. Le calcul des paramètres peut se faire à l'aide des logiciels d'optimisation qui sont présentement tous basés sur des calculs par itération. Samih (1988) distingue parmi ceux-ci :

1) Les méthodes directes, telle celle de NELDER et Mead (1965), utilisée pour le calcul de la figure 5-1 (p. 303), qui ne permettent pas une appréciation directe de l'imprécision (écart entre les valeurs observées et les valeurs homologues calculées à partir de la fonction ajustée). Cette appréciation de l'imprécision permet de juger le meilleur modèle mathématique de représentation des données observées (SORRANTINO et SOTO, connu, pers.).

2) Les méthodes analytiques : ces méthodes optimisent à chaque pas de l'itération.

3) Les méthodes de minimisation de l'imprécision, telle la méthode de GAUSS-MARQUARD, qui minimise la somme des carrés des écarts (écarts entre observés et calculés homologues).

H. Simulation et similitude

La calibration étant faite, on peut lester la simulation à l'oeil en constatant l'inadéquation globale (non superposition) entre observations et calculs (fig. 5-1, p. 303). Si l'ajustement n'est pas rejeté à ce stade, il est possible d'utiliser des tests portant sur les valeurs résiduelles (écart entre observées et calculées) qui sont indépendamment et identiquement distribuées (test de Durbin-Watson) ou des tests d'égalité sur vecteurs (maximum de vraisemblance ou recherche du moindre carré).

L'acceptation, ou le refus, d'une simulation est essentiellement décisionnel (p. 384) et dépend de la nature (qualité) des données, de leur coût d'acquisition, mais aussi de l'usage du modèle. A cet égard, l'utilisation de coefficients classiques mais peu sensibles, comme le coefficient de régression, ne saurait être seule une garantie : tout dépend de l'usage envisagé.

Par exemple, dans un travail visant à calculer le débit d'azote émané par un lombricien, et en l'absence de logiciel d'optimisation des paramètres, Ferrière (1986) (fig. 5-1, p. 303) avait calculé une fonction d'état du ^{15}N de marquage en simple exponentielle dont le coefficient de régression $r = 0,989849$ pouvait être considéré comme excellent. L'observation de la fig. 5-1 montre toutefois un défaut de courbure du modèle par rapport à l'observé. Pour décrire le changement de l'état ^{15}N du

compartiment, on pourrait se contenter de la fonction y_{lr} mais l'objectif était, pour l'ISTEC REAL, le calcul du débit qui se fait sur la fonction dérivée. Pour cet objectif la fonction est inadéquate, le défaut de courbure devient intolérable. La possibilité d'utiliser un logiciel d'optimisation (NEIDER et MEAL, 1965) a permis de calculer une fonction y à double exponentielle conduisant à un coefficient de corrélation r à peine amélioré (de 0,97 % !), mais à une estimation beaucoup plus exacte du débit ($y_j = 72$ mg N/g N ; $y_{>2} = 148,6$ mg N/g N corporel/jour) soit une erreur relative de 51,6 % ! Un tel jugement d'expert pourrait être justifié par heuristique.

Le débit (cinèse entrée-sortie), à compartiment *Nicodrilus* constant, peut se calculer simplement sur la dérivée à l'origine lorsque tout l'azote excrété est du ^{15}N marqué au taux initial. Notons que le débit d'azote initialement marqué diminue au fur et à mesure de son remplacement dans le corps par ^{14}N non marqué, qui le remplace également en émanation. Par exemple, la deuxième moitié du ^{15}N corporel sera excrétée avec un débit beaucoup plus lent que la première moitié. Toutefois, la proportion $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ des émanais n'est pas à un instant t donné nécessairement proportionnelle à celle du rapport $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ du compartiment observé, des contrôles métaboliques de ce compartiment (ici *N. longus*) régulant les excréta à partir d'un sous-système complexe (= le compartiment). En conséquence, la demi-vie d'un élément marqué, ou remarquable, d'un compartiment complexe n'a pas la même signification que la demi-vie d'un radionucléide (dont l'émanation est fonction directe de la concentration du compartiment).

Le marquage d'une caractéristique d'état d'un compartiment (proportion d'isotope, fraction d'un peuplement, ...) permet donc de calculer les taux de renouvellement, c'est-à-dire les débits à travers les peuplements.

Dans certains cas favorables, ils permettent de suivre la destinée des éléments issus d'un compartiment vers un autre. C'est typiquement le cas des animaux migrateurs qui quittent une portion d'espace et peuvent être retrouvés dans d'autres compartiments d'espace. C'est aussi le cas dans l'expérience décrite fig. 2-13 (p. 150) ; l'azote, après un transit bref dans le sol, a été en totalité assimilé par le compartiment plante qui l'a accumulé en suivant une fonction d'accumulation (J = temps en jours)

$$y = 1000/1 + (6,73 - De^{0,01027J} + J/0,00673 - J + 0,01628 - 1/0,0673$$

On reconnaît ici une fonction logistique, associée à une fonction exponentielle autofreinée (BOUCHE et FERRIERE, 1986).

Les fonctions de transfert lombriciens-sol-plantes peuvent être développées simultanément, en tenant compte de toute l'information disponible (SAMIH, 1988).

La calibration des paramètres étant faite, on peut être amené à rejeter le prédicat initial et à rechercher une fonction plus pertinente, voire des données plus fiables, en fonction des connaissances de l'expert et de ses objectifs de validation.

1. Qualité des données et modalités d'ajustement

Les ajustements des données se font à partir :

- a) des données disponibles,
- b) des objectifs de recherche,
- c) des modèles mathématiques disponibles.

Ces trois bases sont usuellement loin d'être cohérentes entre elles.

Les données sont souvent biaisées, insuffisantes, voire erronées ou inadéquates. Le choix de l'outil mathématique, par ailleurs usuellement limité, devient dans ces conditions un exercice qui demande une compétence spécifique de biométricien et une critique objective de la qualité des données, des simulations et des choix d'objectifs.

La discussion des difficultés rencontrées pour la modélisation sur données discontinues (discrètes) relatives à des populations à partir de stades estimés par des

techniques biaisantes est présentée par HADJIBIROS (1978). Divers moyens de modélisations, ou d'aide à cette modélisation, sont discutés par Cancela Da FONSECA et HADJIBIROS (1977), CANCELA DA FONSECA (1980) et LEBRETON et MILLIER (1982). Les choix de la modélisation portent donc sur 1) une synthèse des données, 2) des hypothèses de synthèse (= propositions inférencielles) et 3) des options à travers la sélection des données.

Ces choix devraient être explicites. Si la modélisation fait intervenir des algorithmes de traitement des données, les hypothèses devraient être explicitées par heuristiques. Le nombre de choix à chaque pas du raisonnement n'étant pas illimité, des logiciels d'aide à la modélisation pourraient être développés, ce qui est d'ailleurs amorcé notamment par le projet EDORA (GOUZE et VIGNARD, 1984 ; PAVE, 1987).

6.6.6. Modèles et systèmes réels

1. Validations et portée dans les systèmes réels

La validation est le mot générique recouvrant l'opération de contrôle effectué sur un modèle. Comme un modèle s'inscrit dans un processus de modélisation indéfini dans la composition (complexité), l'espace et le temps et en fonction de sa véracité *versus* les systèmes réels, on conçoit que ce processus recouvre des opérations aux significations opérationnelles fort diverses.

La validation est une étape quelconque de vérification du modèle et de réfutation de ses hypothèses constitutives. Essayons pour nous résumer d'en dégager les modalités essentielles et interdépendantes.

A. L'autovvalidation

On y vérifie la similitude entre les données ayant permis l'élaboration du modèle et leurs données homologues obtenues par simulation. Il n'y a pas de prédiction originale mais la vérification que les prédicats significatifs retenus et la calibration des paramètres permettent de retrouver approximativement les données initiales. Il n'y a pas de pronostic ni sur le temps, l'espace ou les composants systémiques. Cet autocontrôle peut être pratiqué sur un simple ajustement ou après connexions en modèles plus complexes.

B. La prédictibilité

Elle vise à étendre les aptitudes du modèle hors du domaine des données initiales ayant permis son élaboration. Ceci se fait en modifiant certaines variables d'entrée et en vérifiant, sur le système réel ayant eu ce même changement, que les autres variables obtenues par simulation du modèle coïncident "suffisamment" (décision d'expert avec ou sans l'aide de statistiques décisionnelles).

Par exemple, un changement temporel de l'objet mimé (e.g. une plante) peut être accompagné d'un changement de mésoclimat telle, parmi les variables climatiques, la température. La prédiction obtenue par le modèle dans ces nouvelles conditions mésoclimatiques sera ou non validée par rapport au réel (par exemple, pour l'intensité de la respiration nocturne).

De même un changement spatial du réel pris en compte peut être introduit comme variable d'entrée et le modèle simuler, dans son domaine de compétence, des données homologues (par exemple, un modèle de croissance appliqué d'un lieu à un autre en introduisant les variables mésoclimatiques du nouveau lieu).

Enfin, on peut changer la composition des compartiments du modèle en considérant, par hypothèse, que tel compartiment est un compartiment analogue à tel autre (dans notre cas que la plante X respire comme l'espèce Y).

La prédictibilité peut conduire à se placer dans des échelles de temps où le réel n'existe pas encore (prédiction pour les 20 ans à venir) mais rien n'empêche préalablement d'effectuer les prédictions en des conditions spatiotemporelles réfutables ce qui est en fait indispensable pour valider les modèles, e.g. dans les pronostics relatifs aux changements terrestres globaux (p. 513).

C. La transposabilité

La transposabilité du modèle permet seule cette prédictibilité, il s'agit d'une propriété du modèle d'autant plus grande qu'elle ne dépend que de peu de variables d'entrée initiales et d'ambiance pour lui permettre les changements dans l'espace-temps et la composition lui permettant la validation effective de ses prédictions. Il faut éviter de concevoir un modèle trop complexe pour n'être pratiquement confrontable qu'à son système initial (aux données initiales) ; ce qui en fait une hypothèse non réfutable puisque seule l'autovalidation est possible et toute autre prédiction est en pratique invérifiable ; ce cas n'est pas rare.

La portée d'un modèle croît avec sa transposabilité dans l'espace, le temps et la composition : elle en valorise le développement et en fait un outil permanent de validation réitérée des connaissances. Un modèle doit donc être conçu pour être transposable dans l'espace-temps ; cette modalité a été décrite ci-dessus (prédictibilité).

D. L'écovalidation

Valider un modèle systémique à son système implique donc initialement sa conception pour une future transposabilité lui permettant non seulement l'autovalidation initiale mais des validations au réel dépendant de sa portée, donc de sa transposabilité.

Mais l'écologue étudie des objets réels bien précis : les systèmes écologiques interconnectés avec l'écosphère. S'il peut à titre transitoire faire une autovalidation ou une validation d'un modèle sur un autre (d'un infosystème par exemple sur un microcosme) sa recherche ne sera réfutable que par rapport aux systèmes écologiques réels ; cette ultime validation est l'écovalidation.

Un ISTE (Infosystème Spatiotemporel Ecologique à Compartiments), totalement descriptible en termes de composants, de données initiales et d'hypothèses, assure le pronostic de résultats ultérieurement contrôlés par des DICs issues du champ écologique.

2. Ecovalidation, transposabilité et systémique

Le Processus Répétitif d'Accroissement des Connaissances systémiques (p. 357) développé dans ce paragraphe constitue donc l'un des deux moyens de développement de l'écologie. Il implique que les connaissances soient acquises et décrites depuis chaque système par des modèles d'abord simples puis plus complexes résumant, l'information en infosystèmes. Les ISTEcs sont des modèles écologiques pouvant devenir complexes par connexions. Si l'on conserve leur transposabilité dans l'espace et le temps avec peu de variables d'ambiance, leur écovalidation peut se pratiquer en de nombreuses situations. Enfin, s'ils ont des composants pas trop particuliers, leur portée est grande. Arriver à leur écovalidation locale est une étape importante ; écovalider leur transposabilité par leur usage sur des compartiments homologues en des lieux et temps différents permet aux ISTEcs une généralisation qui seule permet une contribution exhaustive à la connaissance de l'écosphère.

A cet égard, ne propriété importante des ISTEcs est celle relative à leur structure. Celle-ci porte simultanément sur les compartiments d'une part et d'autre part, sur leur fonctionnement (cinèses et exnéats commandant ces cinèses) entraînant des variations d'état. Comme indiqué ci-dessus un même objet, dans les mêmes contraintes de facteurs d'environnement, fonctionne de façon identique. Or, nous avons vu, au paragraphe B.4., que des objets quelconques pouvaient être classés selon leur identité, leur proximité ou leur différence de façon éventuellement hiérarchisée. Ceci a pour conséquences :

1) Des régulations jouent, sur les cinèses de systèmes correctement décrits, un rôle régulateur identique sur des systèmes identiques. Remarquons ici que le mot "identique" est pris au sens relatif que l'on pratique pour les individus d'une même espèce ou d'une même variété d'une espèce (p. 250). L'identité, mesurable, a été discutée par ailleurs (p. 338).

2) Un fonctionnement, et d'une façon plus large toute connaissance objective sur un système écologique décrit dans un modèle à compartiment factuel, est extrapolable sur tout système identique en conditions fonctionnelles (= exnéats) identiques.

3) Des fonctions observées sur des systèmes divers sont interpolables entre ces systèmes en fonction de leurs degrés d'identité relative.

4) Le fait de pouvoir référer tout système écologique à son champ écologique et de situer ces systèmes relativement les uns aux autres (p. 292) dans l'espace-temps et leurs degrés d'identité (p. 373) permet d'interpoler les connaissances entre systèmes. Ces degrés sont mesurables notamment par typologie avec l'AFC. Les acquis et singulièrement les rares connaissances fonctionnelles disponibles sur des systèmes peuvent être interpolés, voire extrapolés, pour validation (vérification) sur d'autres systèmes morphofonctionnellement identifiables. Ces interpolations peuvent enfin être optimisées, grâce au RV (p. 378), par le choix de systèmes ayant des qualités complémentaires pour y focaliser les études morphofonctionnelles synthétisées par ISTECS, ces recherches étant toujours lourdes.

Par exemple, le modèle REAL 11, déjà évoqué pages 410 et 414 comme élément descriptif du cycle de l'azote, lie la biomasse des lombriciens anéciques et les variables d'ambiance (hydriques, thermiques et photopériodiques). Il peut être appliqué par transposition à diverses situations écologiques résultant de la gestion de l'espace faite par l'homme (gestion biologique des végétaux, des animaux ou physique des sols ou encore chimique de l'espace) induisant des changements des états des peuplements lombriciens dans diverses conditions d'ambiance (fig. 6-16, p. 411).

La transposabilité du modèle permet alors de vérifier son écovalidité en diverses conditions écologiques et socio-économiques. Si les faits observés diffèrent sensiblement des prédictions, la recherche des causes de cette disparité permet d'améliorer la démarche générale d'acquisition-interprétation du modèle.

Reprenons l'exemple cité ci-dessus des échanges d'azote au niveau du système lombriciens-plantes. Cette observation se rapporte à une espèce lombricienne précise et en conditions de végétation printanière. Elle est précieuse car elle est l'une des rares observations quantifiées *in situ* d'une portion du cycle naturel de l'azote en porosphère non perturbée, les composants azotés étant localisés normalement dans leur structure morphofonctionnelle.

Il est difficile de l'extrapoler objectivement dans l'immédiat à d'autres prairies du même type, la typologie prairiale n'ayant pas encore fait l'objet d'études écologiques globales multidimensionnelles à caractère général.

Par contre, l'interpolation est rationnellement possible sur la base des catégories écologiques (p. 245) car l'espèce lombricienne en cause *Nicodrilus longus longus*, Ude 1881, appartient à une catégorie écologique précise : celle des anéciques (fig. 3-2, p. 247). Il s'agit d'un classement morphofonctionnel, fondé par classification multivariée des caractéristiques individuelles regroupant les taxons ayant des convergences morphofonctionnelles (BOUCHE, 1980b et c). Cette convergence morphofonctionnelle permet une interpolation des connaissances (au moins dans certaines limites d'erreurs initialement non validées) à des taxons morphofonctionnellement voisins (= les anéciques *stricto sensu*), ce qui justifie une extrapolation spatiale à tout peuplement ayant une structure anécique quantifiée. En première approximation, le débit d'azote est proportionnel à la biomasse qui le contrôle, dans les mêmes conditions mésologiques.

Si l'extrapolation sur une base morphofonctionnelle semble possible, les conditions mésologiques (mésoneats) peuvent faire fortement varier le débit d'azote. La régulation écophysio-logique de ce taxon a pu être indirectement mesurée *in situ*. Cette mesure est fondée sur la vitesse de réponse à un stimulus appliqué au terrain dans des conditions climatiques variées. La fraction d'animaux sortant sous l'excitation provoquée par une solution diluée de formol dépend subjectivement des conditions d'activité des *N. longus*. Enroulés en diapause (léthargie) ils ne sortent

pas ; leur sortie est enfin fort réduite par temps froid (faible mobilité) ou n'est que partielle ou nulle par sécheresse.

HEIDET *et al.* (sous presse) ont utilisé cette propriété pour ajuster au mieux cette "activité" aux divers paramètres influant sur celle-ci. Ils ont obtenu un ajustement aux conditions thermiques et hydriques, et décrit le rôle de la photopériode sur cette activité (indépendamment DEBOUT et SAUSSEY (1985) en apportent la preuve expérimentale) (p. 208). Un tel ajustement, qui n'explique pas toutes les situations particulières (incluant les erreurs) dues à la diversité temporo-spatiale des conditions des points étudiés sur 3 ans, résume toutefois celles-ci de sorte que les autres interférences apparaissent comme aléatoires (selon une distribution unimodale autour de l'ajustement).

Cet ajustement se trouve recoupé par les résultats de FERRIERE (1986) ayant trait à une propriété différente : le débit d'azote. La fonction présentée fig. 6-2 (p. 347) s'avère en effet d'une remarquable uniformité fonctionnelle malgré les variations thermiques enregistrées au sol. Or, précisément, le meilleur des ajustements fonctionnels de HEIDET *et al.* (*op. cit.*) a conduit à "optimiser la température" en ne retenant pour celle-ci que les valeurs qui, dans le gradient du sol, se sont avérées les plus proches de l'optimum calculé. Cet ajustement met en évidence l'aptitude des anéciques à utiliser leurs galeries verticales pour choisir des conditions thermiques (et hydriques) optimales et donc réguler leur métabolisme : aucune température d'un horizon du sol fixe ne correspond à celle de ces animaux.

A nouveau un recoupement se présente. Dans un travail préliminaire de mise au point, Ranc (1980) avait réussi à mesurer la température corporelle de ces animaux au terrain. Cette microthermométrie dans un ver de terre avait conduit au constat que la température des *Nicodrilus longus* ne variait pratiquement pas pendant une période de 32 jours, malgré le réchauffement général du sol pendant cette période (BOUCHE, 1983b).

Ainsi un ensemble d'approches écophysiologiques portant tant sur les régulations d'activités liées à la température, l'hygrométrie et la photopériode, que sur la mesure effective de la température corporelle au terrain (différente de celle de tout niveau dans le sol, cf. modèle spéculatif, p. 396) et de mesures de fonction (débit d'azote) *in situ* se recoupent mutuellement et donnent une image cohérente. On pouvait dès lors espérer extrapoler ces mesures de débit d'azote, contrôlables (car la technique de mesure *in situ* existe) sur l'année dans un même site en s'appuyant sur le niveau d'activité moyen. On peut encore effectuer l'extrapolation entre stations en se fondant

a) sur la biomasse des populations anéciques, celle-ci étant un innéat à l'infosystème décrivant le système en cause mais étant modifié par les conditions externes (exnéats) tant du milieu (mésonéats) que des actes,

b) sur les conditions pédoclimatiques prévalant dans ces milieux (température, humidité, photopériode) (fig. 6-16, p. 411).

Nous étions donc en situation de vérifier les prédictions de telles interpolations ou extrapolations morphofonctionnelles dans le champ écologique en simulations, fondées sur des faits et en s'appuyant sur des modèles écologiques objectifs donc réfutables.

Au moment d'achever le manuscrit de cet ouvrage, les résultats acquis par IAMEEI (1989) valident la démarche adoptée de différentes manières. Cette recherche, entre autres objectifs, porte sur le développement d'un microcosme lombricien-sol-plante permettant d'analyser les étroites relations mises en évidence *in situ* par FERRIERE (1986) et BOUCHE et FERRIERE (1986) par l'étude des états ¹⁵N de *Nicodrilus longus*, sur la reproduction *in situ* de l'observation de FERRIERE (1986) et FERRIERE et BOUCHE (1985) de la mesure du débit d'azote pour un anécique. File utilise un épianécique, se comportant en anécique au stade adulte, *Lumbricus terrestris*, L. 1758, et a été pratiquée dans le champ écologique dans un autre lieu (en climat méditerranéen) et autre sol que les premières mesures.

Le rapprochement des résultats d'HAMEEO (états en microcosme et au champ en fonction du temps) avec ceux de FERRIERE (en microcosme et au champ en fonction du temps) peut se faire sur la base des débits (en pour mille de l'azote corporel émané par jour) dans les 4 situations observées. La figure 6-18 présente la relation entre ces estimations de débits, appuyées sur le rapport $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, observées par 81 mesures corporelles en 2 microcosmes, 2 terrains et sur 2 espèces anéciques. On note la remarquable uniformité des réponses permettant le calcul d'un Q_{10} de 1,6524 pour une équation exponentielle simple, respectant la loi D'AKRHENIUS.

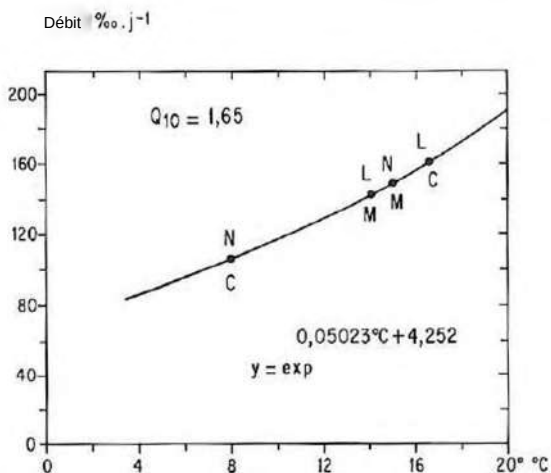


Figure 6-18 - Ecovalidation au champ (C) des débits mesurés en microcosmes (M), transposabilité transgénérique entre anéciques (L = *Lumbricus terrestris*, N = *Nicodrilus longus longus* et transposabilité inters ta tionnelle (NC = Côteaux, Côte d'Or ; LC = Lavérune, Hérault). Les débits d'azote par unité de biomasse ne dépendent que de la température en conditions d'activité (débits calculés depuis 4 ajustements fondés sur 81 rapports isotopiques : fig. 5-1, p. 303) (d'après HAMEED, 1989).

Il y a à la fois écovalidation des microcosmes au champ, démonstration de l'identité fonctionnelle trans-spécifique et transgénérique (*Nicodrilus longus* os *Lumbricus terrestris*) des anéciques (fig. 3-2, p. 247) et preuve de la transposabilité du modèle d'assimilation/émanation entre lieux éloignés ayant des sols et climats différents.

Ainsi les Infosystèmes SpatioTemporels Ecologiques à Compartiments (ISTECs) se présentent comme de puissants outils d'intégration de données vis-à-vis d'un système écologique local et comme un moyen d'interpolation entre systèmes locaux (partiellement) décrits. Cette interpolation permet le passage des holocénoses aux écornes.

Toutefois, ces intégrations de connaissances complexes ont des conditions d'applications précises et peuvent être éventuellement complétées ou réévaluées. Elles doivent être en permanence tenues à jour et accessibles ; ceci est aujourd'hui possible comme décrit au chapitre suivant.

CHAPITRE SEPTIEME

INTEGRATION

7.1. L'intégration des connaissances

7.1.1. Introduction

L'écologie est définie comme une science globale. Son objet d'étude le plus étendu est l'écosphère mais aucune étude ne peut appréhender globalement la connaissance de celle-ci à tous les niveaux d'interprétation de ce système extraordinairement complexe où s'effectuent les relations des organismes avec leur milieu et la quasi totalité des actes humains.

'foute étude écologique ne porte donc que sur une acquisition objective {— liée à un objet d'étude) très partielle el ne peut à son niveau percevoir et interpréter qu'une portion minuscule de l'objet d'étude des écologues.

On peut arbitrairement limiter chaque étude à un domaine. Mais c'est ignorer que Ulule interprétation bornée est carencée par absence de connaissances du domaine général où elle s'inscrit el par méconnaissance des mécanismes sous-jacents aux phénomènes observés. En fait, à toutes échelles d'espace, de temps ou de composition (complexité), il y a *continuum* hétérogène entre les composants des écosystèmes.

Il faut accepter cette situation et admettre que tout travail n'est qu'une contribution à un tout et contient des parties, elles-mêmes analysables ; que toute interprétation est une contribution particulière à l'élaboration synthétique des connaissances écologiques par approximations et complémentations successives ; que chaque étude particulière ne peut s'interpréter efficacement que dans le cadre de cette synthèse.

Dès lors l'intégration s'impose.

Pour des raisons historiques, qui pèsent encore extrêmement lourd dans les pratiques présentes, l'élaboration des connaissances écologiques n'a été intégrée qu'en souhait.

Le désir de cette intégration est très ancien : le discours sur la cohérence de la Nature esl consubstantiel aux théologies et à l'Histoire Naturelle. De même de grands concepts unitaires, tels celui d'holocénose ou d'écosystème, précèdent largement l'écologie contemporaine. La théorie rejoint alors son sens grec classique : celui de contemplation.

Mais d'un point de vue concret, opérationnel, seules de multiples disciplines spécialisées purent apporter un savoir fractionné, limité et relatif uniquement à leurs problématiques sectorielles. Ce savoir est donc non testable vis-à-vis de l'ensemble où il s'inscrivait. L'abord restreint mais concret de ces disciplines a été la condition de leur efficacité ; leur impossibilité à s'inscrire dans le contexte de leurs actions est leur carence.

< < During the last 25 years or so, a previous almost unitary ecology -still not theoretically settled- has been disrupted and segregated into multiple subdisciplinary parcels. They have often been kept fighting among themselves, and in too many cases, been losing ground regarding their foundations on a good systematic biology, as well as on the flourishing biologies placed at lower integration levels and thermodynamics.

Splitting up has occurred either by level of integration (e.g., a population and an ecosystems approach claiming the uniqueness of their flag : reductionism for the first, holism for the latter), either in accordance with their main goals (e.g., the exchange of genetic information on the one side, of energy and matter on the other).

As a result, ecology as a whole has lost scientific coherence and credibility. It has become marginalized in some countries (DI CASTRI, 1984) or is drifting towards the conditions of a soft science -closer to the social sciences realm (DI CASTRI and HADLEY, 1985) ; a strong but usually badly formulated social demand -followed uncritically- is partly responsible for this situation (DI CASTRI and HADLEY, 1986)>> (DI CASTRI, 1988).

D'où un désir, puis une nécessité d'études "interdisciplinaires", de "synthèse", de "théorie écologique" (évoquées comme outils de perception synthétique) résultant d'une part, de l'inconfort du technicien ou du scientifique insatisfait des limites sectorielles limitant sa propre pratique, et d'autre part des effets socio-économiques toujours plus graves résultant de cette absence d'intégration effective des connaissances écologiques objectives.

Vouloir intégrer ne suffit donc pas : il faut pouvoir le faire. A cela il y avait deux difficultés jumelles en ce sens qu'elles sont mutuellement corollaires :

- l'absence de techniques d'intégration,
- la carence de concepts intégrateurs.

Ces deux difficultés n'ont plus de raison d'être

- mais les outils techniques d'interprétation permis par l'informatique moderne et les logiciels d'intelligence Artificielle ne sont pas encore perçus comme l'indispensable outil banal de toute équipe écologique,

- mais les écologues doivent accepter pleinement les conséquences de leur situation opérationnelle - être des spécialistes experts en un domaine restreint et situer tous leurs acquis (données, liens au champ écologique des données, interprétations) dans une intégration effective et permanente (en temps réel). Cette acceptation passe par le renoncement de la perte des DICs qu'ils acquièrent et qui ont une valeur outrepassant leurs objectifs pointillistes et par l'assujettissement des interprétations écologiques à la réfutation, à l'exclusion de tout autre discours.

Cette acceptation implique aussi de renoncer à l'excuse de la complexité pour tout simplement assumer celle-ci.

Pour atteindre à une intégration, non pas en souhait ou en compilation mais réelle, permanente et sans délai, nous aborderons d'abord (ci-dessous) le moyen de se situer dans le complexe puis d'y situer notre contribution au progrès des connaissances globales sur l'écosphère (p. 424). Nous considérerons ensuite les moyens d'intégration en relation avec les démarches de l'élaboration des connaissances (p. 428) avant d'en dégager les conséquences (p. 448) et l'organisation écologique en résultant (p. 460).

7.1.2. Ecologie discriminante

L'écosphère est d'une très grande complexité, nous ne pouvons individuellement que contribuer à décrire une partie de celle-ci. Cela revient vis-à-vis des trois référents (espace, temps, composition) à situer le domaine spécifique étudié. Il s'agit d'une discrimination dans le complexe des systèmes écologiques visant à situer chaque élude. La discrimination est donc la pratique, pour chaque approche de l'écosphère, de situer celle-ci comme contribution immédiate aux connaissances écologiques.

L'écologie porte sur les systèmes biophysicochimiques à des niveaux d'approche allant de l'écosphère aux syntégrons, où l'homme joue toujours un rôle, indirect ou direct, comme acteur sur ces systèmes écologiques. Il y a continuum entre systèmes écologiques, ce qui n'exclut pas hiérarchie entre ces systèmes des plus petits, les syntégrons, nécessairement sous-systèmes des autres, au plus grand système d'intégration : l'écosphère.

(Jette approche à La fois systémique et localisable par discrimination sur tout sous-système de l'écosphère est l'écologie discriminante.

L'écologie discriminante correspond à une démarche scientifique et technique fondamentalement simple mais exigeante qui donne la description du système étudié, les diverses données utilisées et Les liens logiques entre celles-ci en les replaçant systématiquement dans le champ écologique afin de permettre pour toute opération une discrimination adéquate, c'est-à-dire une focalisation optimale en fonction des trois référendaires écologiques (p. 37).

Elle énonce les étapes d'acquisition, gestion et traitement des données, y compris la structure du système d'où proviennent ces données en terme de typologie et de modèle (didactique, conceptuel, infosystème, ISTE).

Une totale transparence et disponibilité "immédiate" des DICs, DSEs, éventuellement DEPs, sur supports d'informations accompagne l'énoncé explicite des choix d'acquisition (y compris descriptifs techniques) et des ensembles retenus. Ainsi la discrimination de chaque partie est rendue possible par la description systémique de l'ensemble.

La systémique discriminante ne porte que sur les données explicitées (DICs, DSEs, DEPs) et exclut tout discours approximatif : "dire" que les données ont été acquises dans une sapinière n'apporte rien. Lier les prélèvements ou l'ensemble des prélèvements de la placette au caractère "sapinière" (ou mieux *Abies sp.*) de cette placette est seul recevable.

Nous avons vu (p. 317, 321) qu'il n'existe plus de limitations techniques à l'intégration des données analytiques initialement acquises pour une motivation particulière, et temporairement justifiée. Grâce à leurs liens entre elles, elles s'intègrent à des ensembles plus vastes, au champ écologique par le prélèvement et aux activités humaines par les actes. Elles constituent l'ensemble des Données Initiales Contrôlées (globales) du champ écologique de l'écosphère. Rappelons, condition *sine qua non*, que les liens des données aux trois référendaires permettent seuls les intégrations, interpolations, comparaisons et études focalisées répétées.

Pur une discrimination (véritable zoomage) ces données particulières peuvent être et doivent être réinscrites dans le champ écologique (ouverture en "grand angle") et réciproquement toute interprétation peut porter, à partir d'une BDR écologique telle ECORDRE, sur une exploitation de données sélectionnées sur requête dans un objectif spécifique focalisé. Aucune contrainte techniquement insurmontable ne limite ces manipulations de données si (mais nécessairement si et seulement si) elles sont écologiques.

Entre les holocénoses locales et l'écosphère planétaire, des écosystèmes variés, ou écorces, peuvent être distingués dans un continuum-discontinuité où les coupures sont plus ou moins manifestes et dépendent du niveau d'observation (p. 35).

L'holocénose est étudiée localement et peut être intégrée horizontalement par intrapolation au pieu (p. 131). Le pieu est un segment de droite orienté verticalement sur le centre gravitaire du globe et borné en haut et en bas par les limites de la biocénose considérée. Les données acquises sur le système morphofonctionnel local (holocénose) négligent l'hétérogénéité proximale du pieu par médiation spatiale exclusivement horizontale. Cette intrapolation au pieu permet ensuite une modélisation en diagrammes (diagrammes d'écosystèmes) puis en infosystèmes.

1. L'intrapolation peut être poursuivie jusqu'au point écologique (la verticalité étant alors intrapolée) ce qui facilitera les futures interpolations.

Les sous-systèmes des holocénoses constituent à leur tour un continuum-discontinuité depuis le pieu jusqu'aux syntégrons.

Les données, leur organisation et leur représentation en modèles seront donc hiérarchisées depuis le plus petit système écologique (le syntégron) jusqu'au plus petit écosystème : l'holocénose. A leur tour, les holocénoses seront interpolées pour décrire l'écosphère (fig. 2-25, p. 194).

Opérationnellement, les unités repérables physiquement sont l'écosphère, les pieux (holocénoses interpolées horizontalement) et les syntégrons. Les autres systèmes écologiques sont des objets conventionnellement définis dans les conlinuums/discontinuités et s'intègrent entre ces trois niveaux.

D'un point de vue opérationnel, les problèmes qui se posent et les méthodes d'analyses-synthèses portent sur l'ensemble de ces systèmes.

Par exemple, les changements globaux terrestres, tel le taux de CO_2 de l'atmosphère, entraînant un risque de réchauffement de l'écosphère, résulte de la somme des émissions des écosystèmes (et systèmes industriels) moins la somme des réductions et carbonatations de CO_2 . Chaque système local (holocénose) est lui-même un assemblage complexe de syntégrons dont les composants biologiques et abiotiques les plus élémentaires régulent par leurs réactions biophysicochimiques à l'échelle moléculaire de ces processus à bilan mondial.

La nécessité d'observer à l'échelle planétaire, et simultanément d'analyser au niveau local, des processus très élémentaires et de replacer ces derniers dans le système général de manière critique et quantitative, implique une intégration systémique et une possibilité de discrimination de chaque processus à sa place.

Ceci se fait par intrapolation/interpolation dans l'espace des trois référendaires écologiques et par connexion d'ISTECs.

7.1.3. Les Processus Répétitifs d'Accroissement des Connaissances

Toutefois, pour effectuer ces opérations d'intrapolation/interpolation liées à l'intégration écologique, il faut non seulement situer les études par rapport aux trois référendaires mais également dans les diverses étapes d'approximations successives vis-à-vis de leurs apports aux connaissances.

Les DICs et leurs liens au réel et aux motivations des études sont gérés automatiquement en BDR ; ils n'y sont pas interprétés. Ils peuvent être utilisés dans deux modes d'interprétations accroissant itérativement la connaissance en ce sens que leurs conclusions peuvent motiver de nouvelles acquisitions de DICs entraînant de nouvelles interprétations. Ces deux grandes modalités d'interprétations, regroupant toutes les variantes scientifiques de celles-ci, sont les deux Processus Répétitifs d'Accroissement des Connaissances ou PRACs (p 357). Si les DICs utilisées peuvent être communes, les interprétations sont différentes et motivent deux modalités d'acquisition de données pour une complémentarité d'utilisation.

Ou bien les données sont utilisées pour observer de l'extérieur les systèmes écologiques, par leurs attributs facilement accessibles, pour les comparer et les ordonner en typologie, permettant de les classer les uns par rapport aux autres. Ou bien l'on cherche à comprendre l'anatomophysiologie de ces systèmes. Le premier cas, est le Processus Répétitif d'Accroissement des Connaissances par comparaison typologique, le second est le l'RAC systémique.

Tous deux nécessitent des DICs sur les systèmes écologiques - les voies d'acquisition et de gestion de données sont identiques. Les objectifs de recherche, les modalités d'interprétation et la signification des résultats diffèrent cependant nettement (tab. 7-1).

PRACS	Comparaison typologique	Systémique
BUT	Comparer puis classer les objets écologiques, les caractéristiques étant des indicateurs <u>externes</u> sur les objets-systèmes	Décrire les relations états-cinèses des systèmes écologiques dont leurs régulations ; les caractéristiques décrivent les composants des systèmes
DONNEES	DICs accessibles dans le champ écologique. Caractéristiques compilées sans préoccupation de connexité systémique	DEPs, DICs, DSEs, établies aux divers stades de la modélisation et de sa validation. Connexité systémique obligatoire
MOYENS PRINCIPAUX	Référentiel des données. Bases de Données Relationnelles Statistiques descriptives Statistiques probabilistes	Modèles conceptuels, concrets et mathématiques. Marquages, interception et autres DICs. Ajustements mathématiques, prévision, validation, Systèmes-Experts. Statistiques probabilistes
PROCESSUS	Transposabilité du général au particulier Remise en cause automatique et itérative avec l'ajout de nouvelles DICs	Transposabilité du particulier au général Système par système, puis connexion en 1STEC. Remise en cause critique des interactions à toute connexion systémique

l'ableau 7-1 - PRACs, moyens et stratégie de recherche

Le PRAC de comparaison typologique demande une étude "superficielle" sur les systèmes portant sur des caractéristiques "suffisantes" de ceux-ci pour les comparer, les identifier, les classer mais sans préoccupations d'expliquer les composants (compartiments et cinèses) dont les caractéristiques les identifient les uns aux autres. Ainsi en est-il des classifications de paysage, de végétation, de sols ou d'organismes. Les éléments ainsi étudiés sont regardés comme des objets et, non comme des systèmes dont on voudrait connaître l'organisation. Les objets observés superficiellement à leurs apparences peuvent être comparés et classés par les outils des statistiques descriptives. Nous avons aussi montré que cependant les critères pris en compte étant non indépendants, du fait de la cohérence systémique, ceux-ci sont redondants, car reflétant certains aspects non interdépendants d'un même objet-système (cf. RV, p. 379). Il est alors possible d'accroître l'efficacité des observations en réduisant les caractéristiques aux observations les plus pertinentes. Ceci permet d'accroître le nombre d'objets observés donc la généralisation des comparaisons typologiques.

Les outils d'optimisation du PRAC de comparaison typologique sont essentiellement les Bases de Données Relationnelles et les statistiques descriptives (multivariées, classification, RV, pour le choix optimal des caractéristiques de description). Les Systèmes-Experts peuvent jouer un rôle dans ce processus répétitif où ils y sont, surtout sous forme de systèmes automatiques de diagnostic, un moyen d'utilisation des résultats.

A l'inverse le PRAC systémique focalise sur une fraction des propriétés d'un système étudié pour être détaillé en compartiments liés par des cinèses. Les composants doivent être connectés, les compartiments les plus gros n'étant pas fonctionnellement les plus importants (paradoxe systémique). La priorité est donnée à l'exploration fonctionnelle du système étudié. Ici les principaux outils permettant de

suivre les cinèses transcompartimentales sont le marquage et la modélisation réfutable. Le nombre d'hypothèses proposées, puis démontrées et acceptées à un moment donné, mais susceptibles de remise en cause, est élevé. Un Système-Expert spécifique, avec un moteur d'inférences évolué, constitue un moyen bien adapté pour décrire l'enchaînement des modèles élémentaires pour un ISTEAC de plus en plus intégré non seulement pour les inférences provisoirement retenues mais aussi les limites d'applications découlant des validations (autovalidation, écovalidation) et portées (prédictibilité et transposabilité). Les outils essentiels du PRAC systémique sont donc les marquages, la modélisation et les Systèmes-Experts Orientés Objets, c'est-à-dire ininvariants et spécifiques à chaque ISTEAC.

7.1.4. Demandes sociales et accroissement intégré des connaissances

Nous évoquerons succinctement au chapitre VIII la demande socio-économique, relative aux applications de l'écologie. De plus chaque étape d'une connaissance améliorée engendre une demande pour une connaissance mieux fondée ou plus généralisée. Cette demande est relative à tous les niveaux de complexité de l'écosphère et est énorme.

L'intégration permettant un progrès permanent et itératif de l'écologie quelles que soient les motivations spécifiques de chaque étude répondant à une demande, peut se faire selon les deux Processus Répétitifs d'Accroissement des Connaissances "indépendants". L'un optimisant l'identification des objets écologiques, l'autre reconstituant ce qui fait que les objets écologiques sont des systèmes.

Ces deux PRACs ont leurs atouts et leurs limites : l'optimisation de l'intégration des connaissances implique une stratégie unique de leur usage et développement. Si l'un permet la comparaison-identification des systèmes (objets) écologiques, il ne dit rien des cinèses qui expliquent leurs compartiments ni des compartiments qui expliquent les cinèses. Si l'autre explique la cohérence systémique il ne le fait que de façon lente et très réduite dans l'espace-temps-composition de l'écosphère. Ainsi la modélisation du système REAL développée au paragraphe 6.6. ne porte-t-elle que sur les lombriciens et n'est écovalidée présentement que sur le cycle de l'azote de deux espèces d'anéciques au stade adulte, dans deux prairies et deux saisons. Autant la couverture de la France et de la Belgique pour l'ensemble des espèces est accessible (BOUCHE, 1972 ; BOUCHE, 1978.), autant chaque rôle systémique n'est que lentement fondé de façon réfutable puis validée.

Dès lors la stratégie s'impose ; chaque donnée peut contribuer à une approche de comparaison-typologie pour distinguer les systèmes ou pour une description du système auquel elle appartient. Devant une demande, la priorité sera tantôt à un usage des connaissances - nécessitant ou non l'acquisition de données - orienté vers la comparaison-typologie ou/et tantôt la systémique. L'approche superficielle de-écosystèmes (perçus par quelques caractéristiques) permet d'optimiser le choix de systèmes pertinents pour les études systémiques approfondies qui, réciproquement, trouvent dans les métriques des distances entre objets établies par les études descriptives des distances pour assurer la transposabilité des ISTEACs établis : les deux PRACs doivent être clairement distingués (fig. 6-4, p. 359) mais se justifient mutuellement dans une stratégie de recherche intégrée.

Réciproquement, notons que des compartiments de même nature (forme identique), soumis aux mêmes contraintes environnementales, sont traversés des mêmes cinèses proportionnellement à leur taille. Ceci signifie qu'il est possible d'extrapoler ou d'interpoler des résultats cinétiques obtenus sur des échantillons de ces compartiments.

Encore faut-il que l'identité des compartiments soit réelle et non simplement formelle. Par exemple, la matière organique morte (nécromasse) d'un écosystème émergé fertile peut être représentée par quelques 10 kg/m² en ce cas, nous avons souvent un système à décomposition rapide, c'est-à-dire à débit d'éléments (tel l'azote, le phosphore, le carbone, ...) relativement élevé. A l'inverse, dans certains écosystèmes la décomposition s'effectue mal (débit lent) et la nécromasse s'accumule

jusqu'à atteindre un équilibre entre sa masse importante et un débit de sortie adapté à cette masse de par exemple 100 kg/m². Ici le compartiment traduit, proportionnellement à sa taille, une réduction de débit par kg : un kg de matière organique du premier cas ne peut directement être comparé à un kg du second.

Sous cette réserve d'identité, aisément vérifiable par un emploi suffisant et adéquat de critères (p. 378), il y a possibilité de mesurer les distances entre composants systémiques.

Toute donnée de la globalyse de l'écosphère peut et doit être référée (p. 296) aux systèmes écologiques classables, notamment par AFC, cette classification permettant une distinction objective des écosystèmes sur la base des données acquises (disponibles en BDR). Des méthodes de classification permettent de les regrouper hiérarchiquement par analogies relatives croissantes ou décroissantes (p. 376). Surtout une sélection par RV permet de retenir celles qui, dans la typologie, jouent un rôle stratégique vis-à-vis de l'ensemble des ensembles considérés.

Des holocénoses "stratégiques" peuvent ainsi être sélectionnées pour leur importance informative sur l'ensemble-écosphère (p. 380) et peuvent alors faire l'objet d'analyses-synthèses importantes : l'étude analytique des processus de ces holocénoses stratégiques pourrait s'intégrer par modélisation morphofonctionnelle de chaque sous-modèles par connexions d'infosystèmes (p. 408). Si les données sont écologiques, elles se prêtent à la construction d'ISTECs (p. 404).

Les ISTECs permettent de replacer toutes données, non seulement dans son contexte de globalyse (comme en BDR), mais dans leur signification morphofonctionnelle. S'il y a connexité systémique (p. 92), les connexions d'infosystèmes de syntégrons peuvent aboutir à des ISTECs de pieux-holocénoses et ces derniers peuvent être interpolés dans l'écosphère. Ainsi la systémique générale des divers systèmes écologiques permet, à tous les niveaux de discrimination, de les localiser, les étudier, les améliorer et les intégrer en tant que sous-ensembles, en travaillant étape par étape.

L'intégration objective est donc réalisable à partir de la totalité des informations disponibles dans une véritable stratégie d'acquisition de connaissances. La nécessité d'un réseau de sites d'étude a été soulignée (D1 CASTU1 et I1ADLEY, 1985), non seulement leur choix peut se faire selon des *a priori* (gradient, identité relative, facilités diverses, etc.) mais il est aujourd'hui possible dans une typologie généralisée de sélectionner, sans privilégier telle ou telle considération "réductionniste" (pédologique, climatologique, gestion de l'espace), les sites pour leur valeur informative intrinsèque et non plus comme curiosité ou relique, mais par rapport aux espaces de l'écosphère quasi analogues.

Il est possible enfin sur des buses concrètes d'interpoler les connaissances entre sites de structure morphofonctionnelle exhaustivement décrits (avec excès de descripteurs inultiredondants, p. 380).

En résumé, aujourd'hui devant une demande de connaissances, la logique voudrait que l'on interroge, via un Système-Expert, une Base de Connaissances et que seulement en cas de carences de celle-ci une acquisition de données, une ré-interprétation complémentaire des comparaisons-typologies ou une optimisation des modèles du réel soient entreprises (fig. 7-1). Nous n'en sommes pas là, l'intelligence Artificielle, outil indispensable, ne faisant qu'amorcer ses effets en écologie. Toutefois, le passage du morcellement actuel foncièrement anti-écologique (car non global) des approches séquentielles à une stratégie intégrée de conservation des données et liens et à l'énoncé ζ heuristiques en Bases de Connaissances impliquent une ré-évaluation de nos pratiques décrites au paragraphe suivant.

7.2. Les moyens de l'intégration

7.2.1. Rôle des Bases de Connaissances

Nous avons déjà souligné, aux paragraphes 5.3.3. et 6.1.3., l'importance de la relation de l'expert avec la connaissance écologique et l'interprétation. L'expert étant un individu possédant un savoir plus ou moins formalisable, exprimé et scientifique (= réfutable). En écologie, les experts interviennent à tous niveaux en tant que spécialistes ayant une perception très partielle, et de ce fait souvent partielle, du global.

Dans les Bases de Connaissances (BdC) la partie formalisable, clairement exprimée et explicite auprès d'un cognéticien, peut être prise en compte. Le logiciel gérant une BdC est un Système-Expert (S.E.) dont les plus pertinents en écologie sont les Systèmes-Experts-Orientés-Objets (SEOO). Une BdC contient dans un langage logique, relationnel, l'opinion de l'expert qui peut également traduire celle des experts pour arriver, sous réserve de cohérence, à une synthèse d'opinion d'experts. Les conflits, relevant d'opinions divergentes (contradictions d'un expert ou d'un groupe d'experts) peuvent être résolus dans un premier temps par une meilleure explicitation ou, dans un deuxième temps, par une recherche spécifique pour lever ces contradictions. Les Systèmes-Experts évolués aident automatiquement, lors de l'énoncé des règles, à l'explication concrète par une interrogation automatique chaînée, par exemple du type "pourquoi ?" et "pourquoi pas ?".

Les Bases de Connaissances peuvent porter sur des objets écologiques. Dans l'état actuel (1989) de leur développement balbutiant, elles ont souvent une applicabilité très restreinte et de multiples contraintes d'usage.

Cette situation va rapidement évoluer ; l'écologie, devant se construire, gagnera à accompagner sans attendre l'élaboration de ces outils tant leur portée pratique est considérable.

- 1) C'est par ces outils que le travail devient collégial au plan cognitif.
- 2) C'est par les BdC que les connaissances subjectives (des experts) se fondent avec les connaissances objectives (des DICs et leurs liens écologiques).
- 3) La logique et le support informatique sous-tendus dans ces BdC sont indépendants des langues. Si les Systèmes-Experts conversent en langages naturels, ils peuvent (pourront) être polyglottes, à la réserve d'une traduction, mot pour mot (mots au sens univoque, p. 11, 564).

Comme déjà indiqué au paragraphe 5.3.3. un Système-Expert d'une Base de Connaissances (BdC) a une interface homme/machine, tel un moniteur d'ordinateur, permettant un dialogue avec les connaissances de la BdC.

Une BdC n'est pas, à la différence d'un fichier informatique, une simple accumulation de faits mais un moyen de mobiliser la connaissance explicitement pour divers usages en reliant les faits par des règles du type < < Si condition x, alors conséquence 1, sinon conséquence 2 >>. Ces règles étant mises en oeuvre sur les faits par un "moteur d'inférence" c'est-à-dire le moyen de passer d'une "vérité" (proposition) à une autre.

Une BdC contient donc des faits et des règles et le S.E. est un moyen de les activer pour exprimer les connaissances quelle contient sous la forme désirée.

Il existe un grand nombre de types de Systèmes-Experts dans ce domaine technique en rapide évolution.

En pratique, deux catégories de S.E. peuvent toutefois être dégagées : ceux procédant par déduction à partir d'un savoir général (holistique) et ceux procédant en outre par inductions à partir de connaissances particulières précises.

La famille des Systèmes-Experts "déducteurs" est importante en écologie, où d'ailleurs elle pré-existait dans la pratique coutumière "sur papier", notamment sous

forme de clés de détermination. 11 s'agit de caractériser par déductions parmi une foule de possibilités la situation singulière qui intéresse. Le dialogue homme-machine revient, à la manière d'une clé dichotomique, à exclure successivement toutes les possibilités sauf la bonne. Le fait d'incorporer les connaissances sur des supports informatiques permet leur fréquente mise à jour et leur adaptation au dialogue homme/machine. Le problème de ce dialogue n'est pas évident : l'expert n'utilise pas du même langage que l'utilisateur quelconque ; il nécessite des liaisons télématiques et un permanent échange entre connaisseur (expert), connaissance et utilisateur.

Ces Systèmes-Experts de diagnostics s'accommodent de connaissances heuristiques du type "Si la feuille est flétrie et présente des taches jaunes, alors...." : ils ne nécessitent pas la connaissance explicite des mécanismes conduisant à cet état de la feuille pour diagnostiquer l'état de la plante. De la même manière, il s'agit de choisir les cheminements efficaces des descripteurs surtout morphologiques utilisés en taxonomie, qui, pour raison de commodité, faciliteront les identifications.

Ces BDC à Systèmes-Experts "déducteurs, pour diagnostics" souvent, au moins dans leur phase initiale, ne dissocient pas les faits des règles, les liant mutuellement les uns aux autres en chaînage arrière, c'est-à-dire par des règles concluant sur des faits (chaînage dirigé par le but poursuivi). Ceci explique que ces BDC ne se prêteront pas (ou très mal) aux inductions, impliquant un chaînage avant, c'est-à-dire l'application de règles à partir des faits inférés (chaînage dirigé par les faits antérieurs, fig. 7-1). Ceci ne lie pas tant au mode de chaînage qu'à la façon dont les faits et règles sont organisés dans les BDC pour diagnostics.

Les Bases de Connaissances pour diagnostics se prêtent particulièrement bien aux domaines où les heuristiques sont importantes et où le savoir-faire limité d'un spécialiste, même très empirique, peut ainsi être formulé par affirmation sur des applications souvent très spécifiques. Il n'implique également pas de logiciels très complexes, les opérations de déduction restant très proches d'un enchaînement simple de "morceaux de connaissances" successivement associés : c'est l'outil de communication du spécialiste aux autres, mais restreint à sa spécialité.

Le développement de telles Bases de Connaissances est très souvent perçu comme une procédure commode pour mettre à disposition d'un public assez large une connaissance d'expert. Leurs développements appliqués sont particulièrement significatifs pour des diagnostics de pathologies (en médecine, en phytoprotection, ...). 11 s'agit d'un moyen de présentation de résultats affirmés et non d'un moyen d'intégration.

Mais pour l'approche globale, transdisciplinaire de l'écologie, ces BDC pour diagnostics, tout en devant jouer un rôle important dans le futur comme guides opérationnels, ne permettent pas d'intégrer les connaissances depuis de nombreux spécialistes initialement distincts. Elles ne se prêtent pas à l'inférence (généralisation) des connaissances.

Par un abus fréquent, un certain nombre de guides automatiques (p. 310) sont présentés comme Système-Expert. Il s'agit de simples clés dichotomiques informatisées, du reste fort utiles, où l'expert décrit et met à disposition une connaissance sans avoir, pour cet usage spécifique, à mettre en oeuvre un logiciel de S.E.. On retrouve ici la même dérive sémantique faisant présenter des questionnaires de fichiers pour des SGBDR (p. 316) et ici des guides automatiques pour des Systèmes-Experts alors qu'il manque dans les deux cas le logiciel caractéristique (ici de la Base de Connaissances à inférence) c'est-à-dire la possibilité de cumuler et gérer indéfiniment faits et règles. Notons toutefois qu'en l'état actuel, le développement de ces guides automatiques de connaissances préparent de toute façon l'intégration explicite de la connaissance d'experts.

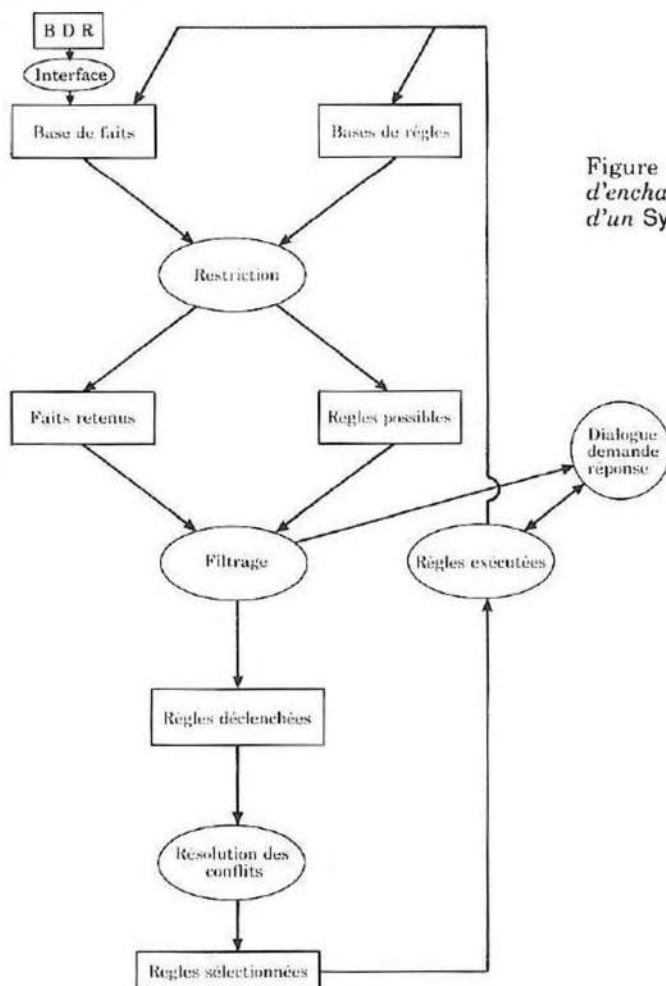


Figure 7-1 - Cycle d'enchaînement des opérations d'un Système-Expert classique.

La deuxième famille, celle des Systèmes-Experts-Orientés-Objets répond par contre à la demande fondamentale de l'écologie relative à l'intégration des savoirs par induction.

Il est tout à fait remarquable que les développements récents de ces systèmes informatiques permet l'énoncé sur des structures homologues aux données objectives (DICs) ou secondaires (DSEs) des "objets", regroupant les faits et des règles considérées "comme des objets". Ces Systèmes-Experts-Orientés-Objets ont la propriété de permettre de créer des Bases de Connaissances où co-existent, les données objectives (DICs) et les données interprétées relatives à des objets et les règles régissant les connaissances relatives aux faits.

Ces Bases de Connaissances permettent ainsi une prise en compte simultanée des connaissances qu'elles fussent objectives, subjectives ou floues. Ces "faits" étant associés en objets eux-mêmes liés à des classes d'objets. Les attributs des objets, peuvent être décrits en attributs communs à la classe par une procédure de liaison dite "héritage" (ou héritance).

Les connaissances portent alors sur des faits relatifs à des objets concrets au sens écologique (fig. 6-5, p. 3(52) mais aussi sur des objets-entités plus abstraits

relevant de choix d'experts, tels les divers éléments de chaque niveau d'une classification hiérarchique adoptée par l'expert. Il s'agit donc d'objets transposés (objets-T) soit directement du concret (partie objective des objets perçue) soit inductivement à travers une classification, un choix, voire une supposition subjective. Dans ce dernier cas, ["objet" est écologiquement subjectif à la différence des objets concrets du champ écologique. Il est regrettable que le nom même de ces Systèmes-Experts-Orientés-Objets consacre cet usage : pour distinguer en cas d'ambiguïté on peut utiliser objet-C (concret) et objet-T (= transposé).

A ces objets sont attachés d'autres faits, relatifs aux propriétés des objets : les attributs de ces objets-T tels que couleurs, poids, vitesse, etc... D'autres faits seront les descripteurs d'attributs (fig. 7-3, p. 434) décrivant les valeurs que peuvent prendre les attributs. Pour éviter les redondances, les attributs et objets-T sont associés au niveau hiérarchique le plus élevé, les objets inclus dans les "classes-objets" générales héritant automatiquement des propriétés des classes-objets.

Il est à remarquer que les objets-T ne sont pas organisés uniquement sur un plan hiérarchique mais sont liés par des classes-objets multiples entre eux dans un véritable réseau de faits. Ainsi un objet-T, tel *Lumbrieus castaneus*, hérite des propriétés des *Lumbrieus* qui eux-mêmes héritent de celles des *Lumbriedae* par les liens "taxonomiques" ; il hérite aussi des propriétés des straminicoles qui eux-mêmes héritent de celles des épigés par les liens "catégories écologiques". N'est attribué à l'objet que ce qui est spécifique à celui-ci, les propriétés génériques étant données aux niveaux génériques adéquats. En conclusion, un objet peut hériter depuis plusieurs objets génériques ; cette pratique permet d'éliminer la redondance des faits-objets.

Les règles permettent de relier, selon des modalités fixées par l'expert, l'enchaînement de faits les uns aux autres. Ici aussi, pour éviter les redondances, les règles sont hiérarchisées. Les méta-règles étant des règles sur des règles de moindre niveau. Certains Systèmes-Experts gèrent (comme le logiciel EMICAT de la BdC ROLUMBRIC) les règles "comme des objets" (mais elles restent évidemment des règles procédurales). Les règles sont alors nommées comme des objets et cela permet d'y appliquer les propriétés d'héritage avec les facilités de construction d'arborescences et de réseaux, d'élimination des redondances et la possibilité de leur associer des attributs et procédures.

De tels Systèmes-Experts-Orientés-Objets (— SEOO) se prêtent à la démarche inductive ; c'est-à-dire à la généralisation à un domaine plus large de résultats spécifiques, aux risques de l'extrapolation. Il s'agit d'un risque classique que l'expert peut et doit par corrections répétitives minimiser.

Les Systèmes-Experts-Orientés-Objets gèrent dans leur Base de Connaissance un savoir classiquement stocké dans une base de faits et une base de règles. Ces deux bases étant souvent distinctes mais interactives grâce à un moteur d'inférence (fig. 7-2).

L'important est qu'aujourd'hui les bases de faits sont interfaçables avec les Bases de Données Relationnelles (comme EMICAT et SQL/DS qui fonctionnent tous deux sous VM) c'est-à-dire permettent un transfert des données (DICs, DSEs, voire DEPs) en bases de faits et que les interprétations, même sophistiquées, sont exprimables en bases de règles. La cohérence du savoir écologique objectif sur le champ écologique et des interprétations est ainsi totalement énoncée. Le fonctionnement devant des demandes entraîne simultanément l'exploitation des faits et règles sélectionnés (restrictions) puis la mise en oeuvre avec des opérations de filtrage et de résolution de conflits entre règles (fig. 7-1).

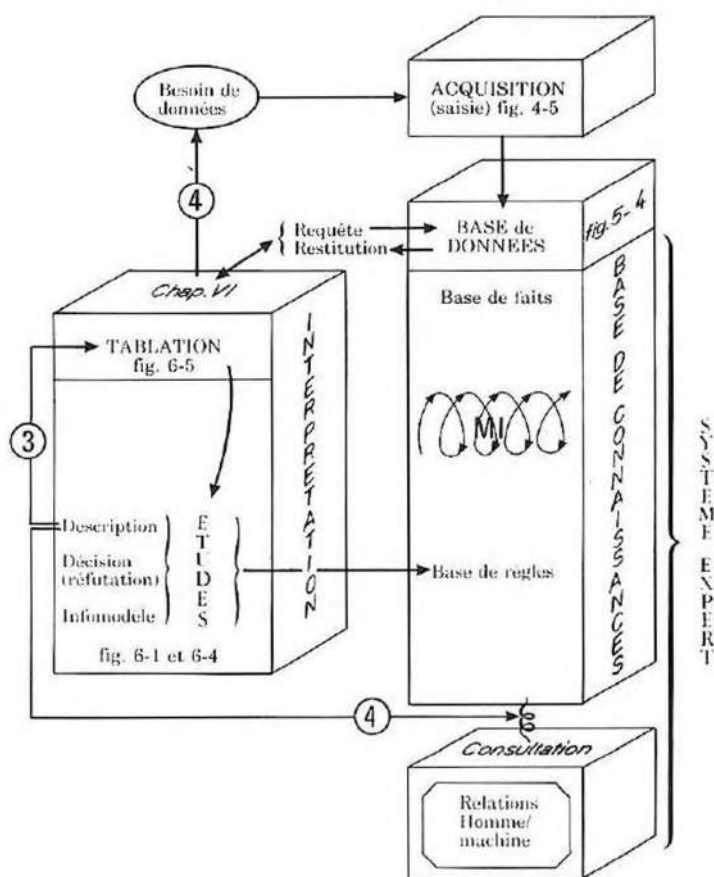


Figure 7-2 - Relations opérationnelles entre étapes d'interprétation et Intelligence Artificielle. MI : moteur d'inférence. Voir fig. 7-5, p. 449.

En l'état actuel, le manque de pratique dans l'échange entre experts et cognéticiens oeuvrant à ces Systèmes-Experts-Orientés-Objets constitue l'un des freins au développement des Systèmes-Experts. Les dernières versions de ces logiciels comportent des guides de dialogues canalisant et structurant le dialogue expert (cognéticien)-machine ce qui accélère sensiblement l'exposé explicite des connaissances dans les BdC en création.

Les SGBDR permettent la gestion des faits les plus objectifs (les DIGs) et interprétés au moyen d'hypothèses (les DSEs). Les hypothèses d'interprétation-acquisition devront être peu à peu explicitées en Base de Connaissances, en décrivant les règles qui guident l'expert dans ses choix d'options et de propositions en assemblages, formatages et prédicats. Ainsi une systématique écologique explicite est réalisable, puis correctible par une optimisation permanente. D'une façon plus générale, la prise en compte des connaissances dans les Bases de Connaissances est en cours, notamment au plan de la présentation des statistiques (GALE, 1986).

Notons la parfaite homologie entre les démarches d'acquisition, de gestion (BDR), de traitement et d'intégration par Intelligence Artificielle (Base de

Connaissance) et l'accord qui en résulte du point de vue opérationnel (fig 7-2, 7-3, 7-5).

Notons également que devant toute question adressée à l'expert, celui-ci peut (pourra) explicitement mettre en oeuvre les connaissances et déclencher leur traitement, validation ou acquisition complémentaire dans une procédure commune aux experts, fondée sur un exposé critique qui pourrait être polyglotte.

Notons aussi que les connaissances apportées par l'Expert sont dorénavant systématiquement intégrables dans un système unique où les procédures explicites peuvent relier les étapes d'un énoncé, les démarches exploratoires et l'écologie proprement opérationnelle.

Notons enfin que les procédures d'héritage facilitent l'intégration à tous niveaux de faits et règles nouvelles - ou leur modification - c'est-à-dire l'évolution de la BdC à l'image de celle de nos connaissances. Les S.E. Orientés-Objets, inducteurs, ne s'appliquent qu'à des domaines précis et circonscrits : ils constituent notamment le moyen idéal d'explicitier les ISTECS.

7.2.2. Intelligence Artificielle et démarches écologiques

L'Intelligence Artificielle permettant l'enchaînement d'algorithmes et d'heuristiques permet l'intégration écologique. Les Bases de Données Relationnelles permettent une gestion exhaustive des DICs de l'écosphère ; les BdC à SEOO permettent l'expression des connaissances acquises par les Processus Répétitifs d'Accroissement des Connaissances.

Les développements de l'intelligence Artificielle en écologie permettent à côté de l'interprétation descriptive (p. 367), décisionnelle (p. 384) et de la modélisation (p. 390) de décrire pourquoi telle donnée a été choisie dans le champ écologique ou requise dans la globalyse pré-existante. A côté des algorithmes, permettant d'effectuer des opérations complexes mais finies sur des données, des heuristiques (p. 102) explicitent, pas à pas, la cohérence des démarches même les plus complexes et indiquent pourquoi tel modèle ou technique a été choisi.

Aux outils logiques (y compris flous) de la mathématique s'ajoutent ainsi toutes appréciations empiriques, hypothétiques et opérationnelles qui ensemble forment la connaissance. Les choix d'experts les plus divers peuvent être explicites sous une forme disponible pour tous experts-créeurs, experts-améliorateurs ou experts-utilisateurs. La réponse d'une BdC peut en conséquence être multiple en pondérant les diverses variantes de leur pourcentage de possibilités. Les carences de ces systèmes d'I.A., qui reflètent les carences de l'intelligence tout court, ayant été formalisées dans ces systèmes, sont itérativement correctibles grâce à l'accès au raisonnement explicite. Il est notamment possible dans une BdC d'intégrer la connaissance de divers experts mais aussi, après consultation, de demander chaque étape du cheminement logique suivi par le S.E. pour formuler sa réponse. Ainsi chacun à son niveau peut potentiellement avoir accès et contribuer aux connaissances par un dialogue homme-machine (fig. 7-2).

En l'état actuel, cette connaissance écologique artificielle est en cours d'élaboration ; sa faisabilité n'est plus douteuse car chaque élément du processus fonctionne. Les problèmes sont abordés par diverses approches complémentaires.

La connaissance (exacte ou fausse) des experts est structurée dans des modèles conceptuels. L'explicitation des règles procédurales, constituant cette structure heuristique, permet l'usage des faits (bases de faits) hypothétiques, admis ou fondés sur des données objectives (DICs). Chaque approche d'expert est alors descriptible en une BdC "prototype" spécifique.

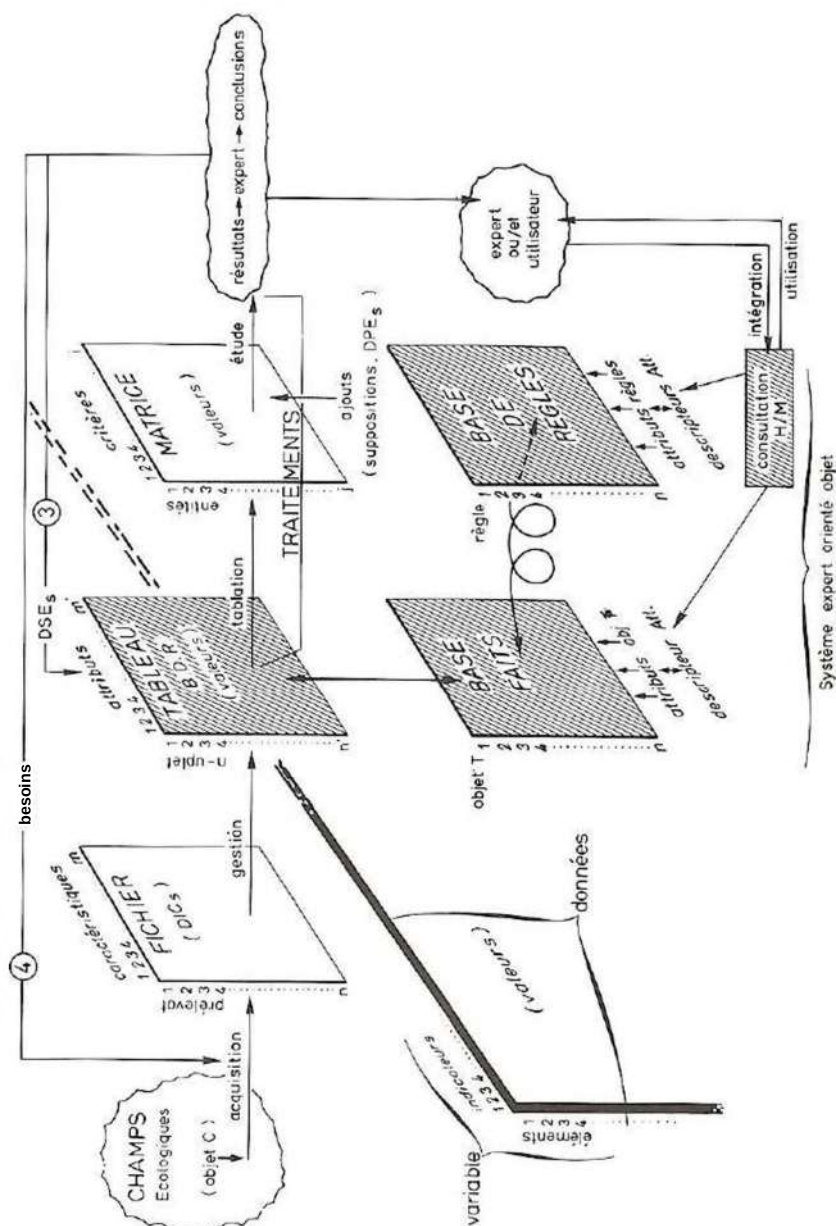


Figure 7-3 - Homologie entre les étapes d'interprétations (fig. 6-6 et chap. VI) et les moyens d'intelligence Artificielle (en hachuré). Les variables (indicateurs x éléments) changent de nature selon les supports (fichiers, tableaux ...).

Des procédures d'acquisition de données, de référentiels de celles-ci, de leur gestion relationnelle interfacée avec les bases de faits sont une autre approche, complémentaire à la modélisation. Cette acquisition est elle-même dictée par la typologie sélective, des règles décisionnelles, des démarches extra-écologiques (sociales) et l'état des connaissances modélisé antérieurement. Un modèle décrit en Base de Connaissances peut, pour être généralisable, être accompagné des heuristiques relatives aux conditions de sa transposabilité spatiotemporelle. Des recherches visent à développer des procédures où des modèles, applicables à des échelles différentes, sont interfaces moyennant des jugements ; par exemple ACKERMAN et CROLI'ER (1988) font intervenir trois éléments : données, modèles et jugements. De tels développements s'intégreront tôt ou tard dans des BdC à Systèmes-Experts-Orientés-Objets. L'accès à ces faits-données et règles-modèles se faisant par un terminal qui peut être simple ou complexe. Ce satellite de dialogue homme/machine peut n'être qu'une simple liaison télématique ou comporter un système lourd d'édition *ad hoc* (p. 382) et d'entrée conversationnel de données.

Aujourd'hui, ces systèmes conversationnels homme-machine existent notamment pour des diagnostics médicaux ou agricoles (Systèmes Experts en Pathologie Végétale : ANDRO *et al.*, 1988). Ils ne couvrent encore que d'étroits domaines sectoriels, car ils procèdent de l'approche séquentielle de chaque spécialiste, mais leur domaine s'étend en superficie (étendue des domaines traités) et en profondeur par le passage de simples guides de diagnostic à de vrais Systèmes-Experts avec Base de Connaissances exploitant une base de faits (et non un simple dialogue hiérarchisé localisé à une approche sectorielle).

Aujourd'hui aussi les Systèmes-Experts sont évoqués (mais non utilisés et *a fortiori* intégrés) pour des usages écologiques divers, telle la prise en compte de relevés de végétation (CAMIZ, 1988), sans résoudre les modalités permettant l'intérêt même de l'intervention de l'expert : son apport à une connaissance générale (écologique).

Aujourd'hui enfin, nous avons montré que les données écologiques objectives pouvaient être gérées, quelle que soit leur nature, par un seul système informatique (p. 321) lui-même interfaçable (par exemple concrètement interfaçage de la BDR ECORDRE à logiciel SQL/DS et de la Base de Connaissances ROLLIMBRIC à logiciel EMICAT).

Plus récemment encore la très rapide évolution de l'1.A. souligne que les SGBD(R), notamment en langage SQL, devenant le standard en la matière, s'intègrent avec les Systèmes-Experts < Tous sont d'accord pour préciser que l'interfaçage SÈ-SGBD n'est plus suffisant et l'on parle aujourd'hui d'intégration > > (Galzin, 1988). Il est évident que les efforts conjoints de la collectivité des écologues ne font que débiter, mais que cet ensemble doit tendre à une cohérence (fig. 7-3.) de l'état des connaissances sur notre écosphère collégialement acquis, partagé, amélioré et utilisé de façon de plus en plus optimale au fur et à mesure des progrès de l'1.A..

Soulignons qu'au niveau des synthèses cette LA. permet non seulement d'exprimer l'opinion des experts, devenue "artificielle", vis-à-vis de faits (dont les objectives DICs) mais permettent une présentation synthétique à 4 dimensions, c'est-à-dire sous forme d'images synthétiques jouant un rôle essentiel pour les décideurs à tous niveaux. Cela s'effectue couramment dans la conception d'avion sur ordinateur (PERRIER, 1989), cela est possible pour toute infographie notamment cartographique de l'usage de l'espace. Ces BdC offrent en outre, devant la présentation d'une simulation à partir d'un infosystème, l'avantage de permettre de remonter aux prémisses (DICs, faits empiriques et règles, d'interprétation d'expert) par l'interrogation du "pourquoi". Ces simulations donnent les moyens de critiquer et donc d'améliorer les progrès de la synthèse-prédiction écologique.

7.2.3. Demandes et problématiques

L'écologie générale aurait pour but ultime de décrire les processus, du plus général au plus fin, se produisant à tout instant dans l'écosphère.

Cet objectif est *a priori* totalement utopique. Remarquons toutefois que :

1) c'est confondre objet d'étude concret et but ultime. L'écologue peut viser cet objectif en sachant que, opérationnellement, seule une fraction, la globalyse, sera utilisable ; raison de plus pour l'utiliser totalement et en avoir une perception optimale ;

2) c'est ignorer que concrètement une masse énorme de données de tout ordre sont acquises pour diverses études fondamentales ou appliquées dans le champ écologique, que ce soit à des fins d'enquêtes ou de recherche causale, de simples descriptions, portant sur des problématiques de génie industriel ou rural, d'environnement, d'agriculture, d'halieutique, d'enquêtes épidémiologiques, ...

3) c'est ignorer que l'homme a, par j'omniprésence de son action croissante, créé des situations dont il est le premier intéressé à en connaître les effets sur les systèmes écologiques ; que ses actes entraînent des effets spectaculaires, tel Tchernobyl, ou incidiels (pollutions acides, contamination des sols en cancérigènes, érosion) et sont à effets planétaires, régionaux ou locaux (RAMADE, 1987). Obligation nous est faite d'étudier les systèmes écologiques ;

4) c'est enfin ne pas tenir compte du fait que les connaissances subjectives des experts peuvent être prises en compte (et à travers elles une information floue considérable), quel que soit l'objectif opérationnel, dans des Bases de Connaissances (p. 428).

Comment passer de l'objectif "utopique" aux réalisations concrètes ?

Par un certain nombre de constats simples et pour tout dire triviaux :

1) L'acquisition de données objectives sur l'écosphère se fait rarement de façon purement fortuite ou sentimentale, des motivations pré-existent, ce sont les problématiques résultant d'une demande formulée à la suite :

la) d'un objectif économique limité : par exemple, une entreprise désire introduire une nouvelle formulation d'engrais ou une nouvelle débroussaileuse,

lb) de difficultés sociales perçues par la communauté humaine

- soit par le spécialiste qui observe une "anomalie" vis-à-vis de son objet d'étude habituel... comme le forestier qui observe des dégradations foliaires inhabituelles plus Lard imputées hypothétiquement à des pluies acides, elles-mêmes imputées à diverses sources acidifiantes (industries, automobiles),

- soit plus collectivement (érosion, dépôts d'ordures, nécessité de réduire les surfaces de cultures intensives dans la Communauté Economique Européenne, etc.),

le) de la démarche interprétative de la science écologique elle-même constatant, par exemple, des carences fondamentales spectaculaires la rendant non opérationnelle, notamment pour répondre aux problèmes évoqués en la) et 1b) (comme par exemple dans les changements globaux, p. 513).

Id) d'un contexte culturel favorisant les acquisitions de données par des amateurs motivés.

2) Les problèmes soulevés obligent à les ordonner dans une problématique qui regroupe souvent plusieurs problèmes particuliers et énonce elle-même d'autres problèmes liés à ceux-ci (p. 450).

3) Ces problématiques requièrent des données, écologiquement factuelles, c'est-à-dire des DICs relatives à une partie de l'écosphère.

4) Les problématiques, qui sont soutenues par un programme de recherche, permettent l'acquisition de données qui, si elles sont écologiques (= scientifiques et relatives au champ écologique), s'inscrivent *ipso facto* dans notre connaissance de l'écosphère.

5) Toute interprétation est synonyme d'hypothèses (chapitre VI). Souvent nombreuses et fragiles, elles peuvent être peu à peu validées par approximations successives si elles sont explicites.

6) En conséquence, à un moment donné, toute problématique ne peut recevoir qu'une réponse partielle.

7) Inscrites dans l'écosphère et temporaires, les recherches gagneraient, quelles qu'elles soient, à ne pas être isolées entre elles et à chacune de leurs étapes : interprétation, gestion des données, acquisition de données (ou l'inverse).

En conclusion, l'écologie générale requiert les données et interprétations acquises vis-à-vis de toute problématique concrète, motivée et réciproquement toute problématique particulière requiert une optimisation par inscription dans le système écologique auquel elle se réfère.

Tout écologue est nécessairement un spécialiste d'une portion du champ écologique. N'est écologue que celui qui apporte des données écologiques inscriptibles au champ ou/et les interprète. Toute démarche d'un écologue n'a de sens que s'il inscrit ses DICs et interprétations dans l'écologie générale.

Toute carence de données sur l'une quelconque des dimensions du champ écologique est carence de l'écologie et a des conséquences intellectuelles sur notre compréhension de notre milieu (l'homme étant dans ce champ), donc de notre rôle dans celui-ci (chapitre VIH).

La carence des données traduit les déséquilibres de recherche découlant de causes historiques, dont les présupposés holistes-réductionnistes, appliqués-fondamentaux, disciplines institutionnellement dominantes-dominées, sont le cas général. La hiérarchie systémique (p. 422) met *ipso fado* cette carence en évidence.

Vouloir se restreindre à une recherche abordable est légitime et opérationnellement indispensable.

Restreindre sa réflexion à un domaine, ou reporter "à plus tard" l'inscription de la recherche dans son contexte, lui-même inscriptible dans la problématique écologique revient à renoncer à l'utilisation opérationnelle des données et résultats.

Il n'y a aucune discontinuité des problèmes et problématiques, seules les contraintes opérationnelles obligent temporairement à une focalisation, puis éventuellement à une focalisation de la focalisation, mais l'on peut successivement approfondir le champ d'observation ou l'élargir. La discrimination doit être la règle (p. 422).

7.2.4. Problématique et objectifs efficaces

La problématique - cadre général d'une recherche - étant fixée, il est possible ensuite d'arrêter plus précisément des "hypothèses de travail" ou objectifs (p. 267). Ces options posent que ces choix réductionnistes permettront une future synthèse.

Ces options n'ont pas de conséquences directes sur la qualité intrinsèque de chaque donnée (p. 288). Elles auront une conséquence opérationnelle globale : choix pertinents ou moins heureux pour la constitution des ensembles de données et sur les futures synthèses réalisées en fonction de l'objectif initial. A la différence des propositions de la synthèse (p. 41, 344), elles n'introduisent pas de propriétés hypothétiques dans des données, mais seulement dans les ensembles envisagés.

Les objectifs de travail sont donc des options (p. 263) opérationnelles qui doivent être explicites.

A l'intérieur d'une problématique énoncée, ERONTIELL (1982) propose de nommer prémодèle le modèle conceptuel qui cherche à donner une présentation cohérente de cette problématique. En pratique, c'est généralement un travail d'équipe où les divers partenaires "s'expliquent" sur ce qu'ils perçoivent et conçoivent mutuellement de la problématique, par exemple à l'aide d'un diagramme conceptuel très général. Ce prémодèle (= problématique explicite) permet ensuite de cadrer des objectifs de recherche concrets.

(Je cadre de la problématique sera modifié au fur et à mesure de l'évolution du groupe de recherche mais jouera le rôle de schéma conceptuel aidant à clarifier les objectifs. (Je prémodèle, généralement vaste, et en partie flou (par exemple, GOUNOT et BOUCHE (1974) pour le groupe CASIMIR), permet de préciser à l'intérieur de la problématique des objectifs focalisés. Ceux-ci, seuls concrètement opérationnels (Casimir, 1982), pourront donner naissance à des modèles conceptuels qui, après acquisition de données permettront notamment des infosystèmes, dont les ISTECS (p. 390).

Dans les débuts de la modélisation "écologique", ces modèles conceptuels servaient souvent de canevas à des tentatives d'infosystème mathématique, court-circuitant toutes les étapes d'organisation, interprétation et validation. Ils ne pouvaient être que des approches non réfutables donc non scientifiques.

Le prémodèle ne pourra pas avant longtemps (pratiquement toujours sous sa forme initiale) devenir la base conceptuelle d'un infosystème. Inversement, le "bouclage" des démarches en Base de Connaissances élimine(ra) graduellement ces prémodèles en motivant les objectifs sur la base d'ISTECs préalables (p. 403). En fait, les prémodèles devraient se "dissoudre" par leur incorporation explicite dans les Bases de Connaissances qui serviront de fondement à tout objectif opérationnel.

Les objectifs doivent être totalement opérationnels. SCHERRER (1984) a étudié les propriétés nécessaires à ces objectifs : je les reprends avec quelques modifications. Ils doivent être :

- 1) explicites, pour être accessibles à tous les intervenants présents et futurs,
- 2) spécifiques pour donner une réponse concrète à l'objectif assigné (réponse positive, négative ou chiffrée),
- 3) conformes à la problématique, c'est-à-dire ayant une validité générale pour répondre à la question posée : l'objectif ne doit pas s'écarter du but défini par la problématique,
- 4) efficaces vis-à-vis de cet objectif précis en prévenant la possibilité d'interprétations multiples (— hypothèses concurrentes),
- 5) compatibles avec les autres objectifs de la problématique en ce sens que la réalisation concrète de la recherche n'interdit pas d'autres études nécessaires à la problématique, par exemple, dissections mortifères d'animaux faisant ensuite l'objet d'études *in vivo*,
- 6) réalistes vis-à-vis des moyens dévolus à l'ensemble de la problématique,
- 7) organisés pour permettre une résolution successive des problèmes pratiques, techniques et scientifiques.

Mais ces propriétés générales, énoncées par SCHERRER, ne sauraient suffire en écologie intégrée. Si les objectifs d'études sont localisables, ils ne sauraient être parcellisés en secteurs.

1. Etudes sectorielles

Dans la tradition omniprésente, un chercheur inscrit ses travaux dans la problématique motivant le type d'étude qu'il entreprend. Il choisit ensuite un objectif partiel pratiquement abordable ; il exprime un modèle conceptuel qui pourra faire l'objet de mises en forme mathématiques variées, de simulations spéculatives, voire d'études en microcosmes pour tendre à rechercher le point le plus sensible du modèle résumant les idées qu'il se fait *a priori* de l'objet d'étude retenu. L'objectif ainsi se définit.

L'étude mise en oeuvre sera alors soit basée sur des observations (simples ou comparatives) soit basée sur des expérimentations, en principe contrôlant totalement l'objet d'étude de l'écologue dans le cadre du fonctionnement normal des systèmes écologiques. Ces expériences créent des conditions d'observation comparées où certains objets d'observation ont reçu une manipulation d'intensité et de matière connue (= actes), par exemple, application d'un pesticide de dose, modalité et date connues sur le système, extrêmement complexe, d'un champ.

A ce stade, des choix de recherches viseront éventuellement à optimiser les modalités du plan d'échantillonnage pour obtenir, pour le même effort d'acquisition, plus d'informations testables d'après une modalité statistique choisie. Cette modalité est présentement souvent fondée sur des probabilités. Elle est parfois contraignante et nécessitera un certain nombre de prélèvements fournissant des données ayant éventuellement une distribution adéquate (telle la distribution normale autour de la valeur moyenne).

Ensuite les données seront interprétées et les résultats seront parfois publiés selon les modalités décrites au paragraphe 5.2.5. Les connaissances acquises ne sont conservées qu'à l'état de conclusion et les données initiales, seules objectives hors des choix d'acquisition et d'interprétation, sont éliminées car devenues inutiles vis-à-vis de l'objectif partiel (particulier) poursuivi.

La plupart des travaux sont actuellement traités de cette façon sectorielle... et l'on éprouve ensuite la plus grande difficulté à intégrer leurs conclusions : d'une façon générale, on regrette les risques incontrôlables pris ensuite en les généralisant subjectivement à partir de leur caractère particulier.

Les études parcellisées, sectorielles, sont malheureusement l'usage habituel de la "science normale" au sens de KUHN (1970). (l'est l'abord séquentiel d'objectifs définis ; c'est le traitement par dossiers disjoints, parfois publiés partiellement de façon rigoureusement non réfutable (absence de DICs et du référentiel) (p. 305). C'est dissocier la synthèse qui ne peut être que compilation.

2. Etudes focalisées

A l'opposé des études parcellisées, la définition d'objectifs focalisés dans le champ écologique constitue une approche parlant des connaissances générales explicites, qui seront notamment accessibles en BdC (p. 428) et "bibliographiques" pour augmenter celles-ci dans le cadre d'une écologie discriminante générale.

Tout en incluant toutes les modalités opérationnelles de l'approche sectorielle, l'approche focalisée est toute différente. Mettant à profit la gestion moderne des données dans le cadre d'une problématique générale, cette approche extraira des BDR (ou encore actuellement des fichiers) le maximum de DICs susceptibles d'alimenter un modèle conceptuel mathématisable et éventuellement définira des choix d'acquisition de données nouvelles complétant la connaissance du système général (fig. 7-4). L'échantillonnage porte à la fois sur un choix de prélèvements et analyses dans le milieu d'étude mais aussi sur une extraction de données à partir de BDR sur requête : il n'est pas toujours nécessaire d'échantillonner le concret, la ré-interprétation des données pré-existantes en fonction de nouvelles problématiques devant devenir beaucoup plus fréquente et proportionnellement importante avec le développement de BDR écologiques intégrant les DICs de l'écosphère. Enfin, à l'avenir les Bases de Connaissances des Systèmes-Experts-Orientés-Objets devraient permettre d'optimiser les acquisitions-interprétations de données.

Travailler dans le champ écologique c'est, quels que soient la problématique et l'objectif particulier poursuivi, acquérir de l'information sur ce champ écologique ; c'est choisir - parmi la multitude des études possibles - de limiter son travail à un domaine étroit, mais c'est aussi inscrire cette étude particulière et tous ses acquis dans le domaine général de ce champ. Cette "inscription" est une nécessité si l'on songe au-delà de l'objectif immédiat : à l'intégration pour synthèse.

Tout simplement effectuer une étude particulière n'est que répondre partiellement à une question souvent beaucoup plus générale. Il est rare que la question réelle soit étroitement bornée.

Essayer la dose optimale d'un engrais sur une variété de blé dans un champ ne vise pas à cette connaissance précise, mais cherche à voir au moins comment cette variété pourrait "répondre" en général (dans toutes les parcelles emblavées) à cet apport d'engrais ou/et connaître comment le blé répond à cet engrais dans ce type de

sol... évidemment moyennant des expériences de contrôle, le but n'est pas l'étude dans ce champ sur ce cas particulier, mais bien d'avoir une idée plus générale.

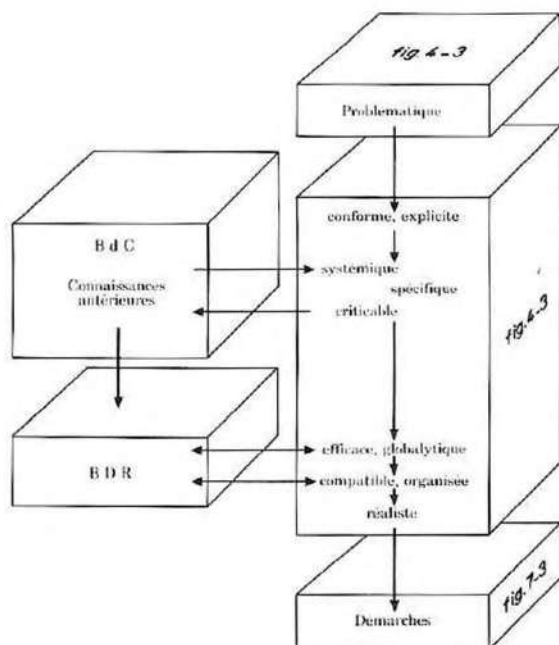


Figure 7-4 - Mobilisation des connaissances et données antérieures lors de la sélection d'objectifs s'inscrivant dans une problématique. Définition opérationnelle de démarches optimisées.

Réciproquement, toute étude acquiert une information pour un objectif précis mais peut être considérée à son tour comme un élément d'une étude plus générale qui "fusionne" plusieurs études similaires au moins pour partie, la fusion portant sur les connaissances complémentaires.

En d'autres termes, les données d'une étude, si elles sont acquises dans un objectif qui en justifie le travail, constituent aussi un acquis fondamental pris dans l'absolu si les données et connaissances ne sont pas perdues et tout spécialement les DICs, par nature les plus objectives. Les opinions d'expert sont également descriptibles en BdC (p. 433). Nous avons vu que de toute façon, la mise à disposition des données et des logiciels de calcul les ayant interprétés est par ailleurs indispensable pour des raisons éditoriales et scientifiques (p. 309, 324).

Aux sept propriétés dégagées par Scherrer pour les objectifs en biologie p. 438), s'ajoutent donc trois propriétés (fig. 7-4) essentielles en écologie. Ce sont :

8) globalistique, données et résultats doivent être référés par rapport au champ écologique,

9) critiquable, (réfutable, vérifiable), par une conservation des caractéristiques explicites, des DICs et liens, des hypothèses synthétiques et résultats (DSEs),

10) systémique, participant à la connaissance explicite des systèmes écologiques ; connaissance perpétuellement réactualisée par les nouveaux acquis.

Un objectif global, et systémique est par essence non sectoriel, ce qui n'exclut pas précis (explicite et spécifique) c'est-à-dire focalisé.

Non seulement les objectifs mais les problématiques, en raison de leur caractère extemporané (ou modifiable), ne peuvent constituer le cadre de l'organisation des connaissances ; celles-ci doivent correctement s'ordonner avec les outils modernes de l'intelligence Artificielle de façon explicite indépendamment des problématiques qui ont motivé leur acquisition (p. 433).

7.2.5. Ecologie discriminante et rigueur opérationnelle

Pour des raisons historiques, les multiples disciplines ayant trait au domaine écologique ont développé des approches sectorielles disjointes. Les acquisitions de données et interprétations ont été exécutées de façon séquentielle et parcellisée. Les interprétations limitées par les outils mathématiques pré-informatiques ont été paucivariées (paucidimensionnelles) et corrélativement les plans d'échantillonnage, souvent frustrés, sont restés rigides, mono-objectifs et essentiellement appréciés en fonction de leur pertinence vis-à-vis des seules statistiques probabilistes.

L'écologie apparaît alors comme un puzzle, de disciplines opérationnellement indépendantes, mais allant vers une perspective globale.

La disponibilité croissante des moyens informatiques adéquats permet une réelle intégration, tous les jours plus poussée, des connaissances. Si cette intégration reste limitée cela tient à la nouveauté de ces moyens, voire à leurs imperfections présentes, mais surtout à l'approche initialement inversée des disciplines morcelées contribuant à l'écologie. Ces micro-disciplines fonctionnent selon des critères et justifications indépendantes alors que l'écologie est d'abord globale en explorant le champ écologique (contenant les actions humaines) et n'analyse que pour la synthèse dans un cadre synthétique pré-existant.

L'écologie, proprement dite, part de son objet d'étude global pour des vérifications analytico-synthétiques et non d'approches particulières.

Quelle que soit leur interférence avec les activités humaines, toutes les données écologiques s'inscrivent de toute manière dans l'écosphère. Toutes les données acquises, peuvent être gérées en BDR, donc elles sont accessibles et constituent notre globalyse (notre perception nécessairement limitée) de l'écosphère.

Le développement de l'informatique classique organisant les données en fichiers a permis le passage aux analyses multidimensionnelles, c'est-à-dire aux statistiques descriptives efficaces, et au stockage de données en grand nombre. L'intégration morphofonctionnelle enfin a pu être entreprise dans des infosystèmes initialement peu factuels et simplissimes. Avec l'informatique classique, l'écologie devient une perspective mais chaque étude reste sectorielle.

L'informatique moderne en dissociant l'organisation des données des structures du support physique, c'est-à-dire en leur donnant leur fluidité, permet toutes les réorganisations souhaitables et lève toute limite à l'organisation des données en fonction de l'écosphère. Elle permet en outre un exposé critique des options, propositions et choix d'expert dans des Bases de Connaissances (p. 428), c'est-à-dire un exposé explicite criticable de notre connaissance, via les DICs, sur les systèmes écologiques.

Pour l'écologue, cette informatique moderne est l'outil essentiel qui lui faisait défaut et qui lui permet enfin une étude de l'objet de sa science, c'est-à-dire prioritairement les études globales. **Il y a littéralement inversion de l'approche car il y a retournement de perspective. On ne tend plus vers l'intégration, on part de données objectives (DICs) restituées dans le champ écologique global (globalyse) pour, selon les besoins, focaliser dans ce champ, sélectionner les données adéquates, les compléter si nécessaire et les interpréter en s'aidant des infosystèmes morphofonctionnels explicités pré-existants. Il y a inversion en ce sens que l'on ne part plus de cas**

particuliers en espérant une intégration ultérieure mais l'on part du global pour étudier un cas particulier ; on part de l'explicite pour l'améliorer .

Ecrire ce paragraphe au présent peut paraître prématuré car de fait les BDR nécessaires n'existent généralement pas et les infosystèmes adéquats sont rares et très limités, quant aux Systèmes-Experts ils restent essentiellement à élaborer, mais rien n'interdit plus maintenant de travailler à partir d'approches globales par focalisation explicite et de telles réalisations existent au moins à l'état de prototypes. Ceux-ci suffisent à montrer qu'aujourd'hui le problème pour l'écologue n'est plus lié à la carence d'outils de synthèse, mais qu'il est maintenant à son niveau, car ses pratiques restent, celles des époques pré-informatique et d'informatique classique que nous venons de vivre.

Notre tâche est aujourd'hui de replacer les études particulières (antérieures) dans le contexte écologique global.

Les focalisations sur des objectifs temporaires précis permettent au chercheur une approche opérationnelle totale. Par discrimination (zoomage), il peut choisir dans le champ écologique, selon les objectifs, des études portant sur des systèmes très généraux ou très précis. Il peut définir une portion du champ écologique où il rassemble les données objectives (DICs) et interprétées (DSEs) par infosystèmes et typologies. Il peut optimiser son échantillonnage par sélection de variables (p. 378) et de sites d'études concrets, eux aussi choisis de façon objective et opérationnellement efficace (p. 380). Il peut enfin corriger en les complétant les données par rapport aux besoins des ensembles de données qu'il désire. Les interprétations synthétiques qu'il obtient sont enfin confrontables aux données plus globales issues du niveau d'observation où s'inscrit son étude. Ses données originales et ses interprétations formalisées (infosystèmes, types) s'inscrivent enfin dans les cadres collectifs d'interprétations plus générales : il y a réellement intégration.

Ceci ne dispense évidemment pas du développement de techniques pertinentes d'analyse pour avoir des données adéquates, souvent manquantes dans des domaines entiers de l'écologie. Bien au contraire, l'approche systémique interdit de porter des oeillères et révèle les carences souvent majeures des connaissances concrètes en écologie : la vacuité des connaissances est mise en évidence objectivement (par rapport à l'objet concret écosphérique considéré). (Jette vacuité bloque le progrès des sciences et est en recherche finalisée rédhitoire (p. 482).

Ceci permet par contre, comme dans d'autres sciences exactes, un bilan exact des connaissances, un inventaire des problèmes majeurs non réglés et un positionnement de toute étude particulière dans son contexte. Au lieu de partir des affirmations d'"importance", de telle micro-discipline ou de tel groupe de pression, au lieu des inodes et de leurs futilités stériles, c'est l'état criticable des connaissances qui doit servir de base aux problématiques.

Ceci permet une critique scientifique, sur la validité des données objectives disponibles, sur la fiabilité des hypothèses acceptées, et par approximations successives une entèreté croissante des connaissances (une réduction des méconnaissances).

Cette critique scientifique est encore mieux intégrée et beaucoup plus efficace par une explicitation des connaissances par les faits et des règles heuristiques mis en oeuvre par les experts dans les interprétations. C'est souligner ici l'importance stratégique des Systèmes-Experts-Orientés-Objets permettant le dialogue avec une Base de Connaissances gérant faits et règles et activant ceux-ci par un moteur d'inférence. Si leur développement est en écologie encore en prototype, cette science du complexe ne dominera son objet d'étude qu'avec leur moyen (p. 309, 433).

Notons également que la rigueur imposée par les plans d'échantillonnage, souvent pratiquement irréalistes (p. 300, 445), peut être alors atténuée par un protocole flexible, c'est-à-dire modulé au cas par cas, au fur et à mesure de l'acquisition-gestion-interprétation en temps "réel" de données du concret par une

optimisation en continu (sans l'organisation séquentielle traditionnelle : sondage, établissement d'un plan contraignant, échantillonnage puis interprétation).

De la même manière, la formalisation mathématique, toujours souhaitable, n'a pas à imposer un moule contraignant à l'ensemble de la démarche écologique qui doit pouvoir être mathématisée et démathématisée (STUNGREN, 1982b).

En "délocalisant" les études sectorielles, en permettant une intégration illustrée dans le continuum des systèmes du champ écologique de l'écosphère, l'écologie discriminante rend l'écologie opérationnelle, y compris, et c'est urgent, pour des objectifs appliqués (chapitre VIII), et lève de nombreux problèmes qui apparaissent aujourd'hui (ou apparaîtront demain, quand cette systémique sera plus généralisée) comme de faux-problèmes anachroniques (p. 455).

7.2.6. Acquisitions nécessaires intégrables

L'objectif d'une étude focalisée étant défini, il est d'usage - dans le meilleur cas - d'effectuer une étude bibliographique relative à l'objectif retenu. Cette analyse textuelle permet de préciser de nombreuses modalités et d'améliorer l'approche. Elle est parfois complétée de consultations auprès de spécialistes, apportant une expérience vécue. Ensuite le chercheur fait des options (= hypothèses réductionnistes) d'acquisition de données. Il traitera puis interprétera ces données avant de conclure.

Ainsi les connaissances préalables peuvent se résumer en "opinions" d'expert - nullement à rejeter car souvent très précieuses, l'"expérience", au sens trivial, d'un forestier, d'un pêcheur ou d'un chercheur "expérimenté" est importante. Elle offre toutefois le défaut majeur de ne pas être susceptible d'une critique scientifique : il s'agit d'une communication informelle non explicite. Elle offre également l'inconvénient d'être en pratique intransmissible, car complexe et souvent subtile ; elle est incompatible avec un jugement critique (autre qu'approfondi en refaisant le travail !). Les problématiques s'appuyant sur des connaissances nombreuses et complexes ne peuvent être ainsi explicites et donc jugées sur le fond, par une commission par exemple.

Les publications n'offrent, dans l'écrasante majorité des cas, que des situations assez comparables (p. 304) d'où la nécessité de mettre en oeuvre les moyens modernes de gestion des connaissances décrits aux paragraphes 7.1., 7.2.1. et 7.2.2..

Les options dépendent de l'objectif retenu et des techniques disponibles.

Les études spatiotemporellement relativement étendues décrivent très souvent des différences d'état et fort peu les relations causales ayant créé ces états.

Pour des études systémiques, les moyens à mettre en oeuvre nécessitent notamment l'étude de cinèses, parfois délicates et coûteuses à acquérir (p. 271) (marquage, échantillonnage diachronique, lectures en continu de certaines variables, modélisation factuelle synthétique, ...).

Il est alors souhaitable d'optimiser le choix de la placette d'étude pour obtenir une information optimale et faciliter l'extrapolation morphofonctionnelle subséquente grâce au coefficient RV (p. 378).

Un développement technique particulier est souvent en outre nécessaire et des études hors champ écologique peuvent, dans une certaine mesure, informer sur des mécanismes potentiels et permettre la mise au point de matériels.

Un objectif de recherche étant arrêté, traditionnellement on établit un plan d'échantillonnage-analyse puis on traite (interprète) les données.

L'Intelligence Artificielle en écologie discriminante inverse en fait totale cette approche. Devant un objectif précis, la première étape est de vérifier que l'on ne dispose pas déjà de connaissances, voire de la plupart des connaissances nécessaires, en consultant une BdC ou au moins une BDR.

Par exemple, pour tenter d'estimer l'importance de l'azote stockée dans le compartiment lombricien (objectif contribuant à une problématique plus générale relative aux états de l'azote dans les sols et les nappes phréatiques), il serait classiquement nécessaire d'échantillonner ces animaux, d'en estimer l'importance pondérale, la composition azotée au cas par cas et enfin de calculer l'azote présente dans la biomasse lombricienne. Nous avons vu, p. 333, que seul le traitement des données a été nécessaire grâce à la BDR ECORDRE.

Il a été en outre possible à chaque étape des opérations d'exercer une critique explicite sur la qualité des techniques de prélèvement mises en oeuvre, de l'analyse zoologique, des mesures pondérales, de l'analyse chimique de l'azote des aliquotes, du groupement d'ensembles (= sous-échantillons) contribuant à l'estimation finale (= échantillon), tous éléments d'options ou propositions descriptibles dans la BdC ROLUMBR1C.

Cet exemple illustre l'exploitation des Bases de Données Relationnelles couplées à des modèles interprétatifs mathématiques.

Devant un objectif de recherche, il faut donc :

1) sélectionner les variables nécessaires

la) en fonction de la pertinence du modèle d'interprétation préexistant comme infosystème (partiel ou complet vis-à-vis de l'objectif),

1b) en fonction de l'information apportée par la variable parmi les autres variables décrivant le système. Ceci est mesurable (p. 378), si la variable n'est pas imposée d'emblée comme l'azote dans l'exemple ci-dessus. Cela accroît la validité externe de l'objectif de recherche. Ceci doit simultanément être apprécié par l'apport (= le poids) de la variable à la perception du système "entier", ce qui est fait par une approche sur l'information acquise. Par opposition, on parlera d'indépendance pour les variables non prises en compte mutuellement (ici encore la modalité de sélection RV assure celle-ci efficacement... dans des sous systèmes dépendants d'un tout). Cette approche réduit également, le manque à gagner (SCHERRER, 1984) puisqu'elle sélectionne les variables complémentaires les plus pertinentes.

Ainsi quatre critères essentiels (entièreté, pertinence, indépendance et manque à gagner), dont l'importance est justement soulignée par SCHERRER, sont simultanément appréciables par le coefficient RV. Le cinquième critère, l'adéquation des données à l'objectif (= "validité" de SCHERRER), est un problème de cohérence objectif - savoir ;

2) s'assurer par requête que les Données Initiales Contrôlées existent (et jusqu'à quelle ampleur) et simultanément, si les modèles (ou sous-modèles) d'interprétation préexistent : si oui les mettre en oeuvre,

3) si non pour le modèle, compléter la modélisation et utiliser les données,

4) si non partiellement pour les données, compléter celles-ci par une acquisition adéquate (déjà éprouvée techniquement puisque des données analogues préexistent),

5) si non totalement pour les données, il faut alors - et alors seulement - procéder à l'acquisition de données en tentant de réunir les 10 propriétés énoncées au paragraphe 7.2.4.

Au cours des options préalables à une recherche se développe ainsi une stratégie d'acquisition, elle-même partie de la stratégie d'acquisition des connaissances (p. 426) qui peut être totalement formalisée à condition d'admettre que celle-ci découle de l'état antérieur des connaissances : les requêtes en BDR ou BdC précèdent l'acquisition dans le champ écologique.

Cet état antérieur permet, pour une problématique, l'arrêt d'objectifs et finalement, si des données préexistent, une sélection explicitée des caractéristiques et des lieux étudiés.

7.2.7. Optimisation des acquisitions de données

A tout stade, il faut délimiter et réduire une méconnaissance antérieure ; hors quelques domaines bien dotés en moyens d'étude, celle-ci est fréquente en écologie. En ce cas, les observations directes et les techniques exploratoires (= sondages) doivent précéder toute construction logique de l'échantillonnage : une bonne stratégie d'échantillonnage doit explicitement accepter, dans un premier temps, l'ignorance et le besoin de collecte de données sans plan fixe préconçu.

A l'inverse, les connaissances objectives antérieures obligent (ou plutôt obligerait si les DICs étaient accessibles, ce qui n'est généralement pas le cas présentement) à en tenir compte dans toute la stratégie d'échantillonnage. Des plans d'échantillonnage optimisent les prélèvements et analyses en vue de l'obtention, sur caractéristiques définies, d'ensembles de données pour un objectif défini et sont généralement seuls discutés dans une abondante littérature biométrique.

Toute étude portant sur un système écologique nécessite des DICs qui sont assemblées en ensembles pour les interprétations. La qualité de ces ensembles dépend des qualités intrinsèques de chaque DIC (adéquation, précision, ...) mais aussi de la représentativité de l'ensemble par rapport à l'objet étudié. L'hypothèse de synthèse de tout ensemble est qu'il est représentatif d'un objet, de hiérarchie supérieure aux données, ou autrement dit que l'ensemble des DICs échantillonne correctement le "tout" auquel il appartient.

Dans les démarches parcellisées classiques, l'acquisition de données précède l'interprétation : les options d'acquisition sont conçues dans l'optique et l'espoir qu'elles suffiront pour la représentation du tout.

En écologie discriminante nous venons de voir (p. 441) qu'une analyse critique des données pré-acquises précède la décision d'acquérir éventuellement des données comme compléments indispensables pour atteindre un objectif : la nécessité de ces nouvelles DICs est justifiée par un modèle focalisé, conceptuel et précis.

Ce choix étant fait les options d'acquisition reflètent nécessairement les contraintes de l'acquisition des données : options sur la problématique, l'objectif, le site, le prélèvement, la distribution temporo-spatiale des prélèvements et les analyses de la composition des prélèvements (p. 267).

Fréquemment, les techniques nécessaires ne sont pas encore développées, surtout pour l'étude de liens quantitatifs de "causalité" (fonctions quantitatives expliquant les causes de changements d'état).

La levée de cette carence technique deviendra donc prioritaire sur l'objectif initial. On peut évidemment s'appuyer sur des études expérimentales, hors contexte écologique, pour connaître les mécanismes biologiques ou/et physico-chimiques qui peuvent jouer dans le système écologique mais la quantification des cinèses (fonctions) ne pourra se faire que dans celui-ci. Si l'organisation et la mise en commun des données écologiques de l'écosystème sont aujourd'hui prioritaires, car non effectuées et faciles, il n'est pas douteux que le développement d'un génie écologique accroissant notre accès aux DICs cinétiques s'imposera rapidement.

Les options peuvent être optimisées par des simulations,

- soit à partir de données pré-existantes,
- soit à partir de données supposées analogues ou coexistantes. Par exemple, la connaissance d'un métal lourd dans l'hétérogénéité spatiale d'un site peut aider à se faire une opinion pour un autre métal dans le même site ou du même métal sur un autre site,
- soit à partir d'un pré-échantillonnage.

D'une façon générale, le choix du site et de la démarche analytique d'acquisition dépend des objectifs, des techniques disponibles (donc de leur développement antérieur) et des moyens mis en oeuvre. Une critique très poussée et

une optimisation par simulation permettent d'accroître la qualité des échantillons de chaque variable (le nombre de DICs) donc de réduire les phénomènes aléatoires.

Par exemple, le problème est de savoir si, pour une même quantité de travail disponible, il est préférable de multiplier le nombre de petits prélèvements ou d'accroître les cotes des prélèvements S_j en en réduisant le nombre.

Les moyens étant presque toujours limitants, une analyse de coût n'est pas inutile, surtout lorsque le choix du site modifie le coût de la collecte des prélèvements. SCHERRER (sous presse) propose une formule pragmatique pour comparer ces coûts. Il montre que la taille optimale (les cotes optimales) sont définies par $S_{opt} = M_{opt} - S_r$ S_j est la taille minimale pragmatiquement admissible. $M_{opt} = (b - 2) c_j / (b - 1) c_2$ C_j est le coût d'accès à une opération d'échantillonnage d'une ou plusieurs placettes d'un lieu ; c_2 est le coût d'acquisition de l'information souhaitée par prélèvement, b est la pente de la droite corrélant le logarithme de la variance d'une variable au logarithme de la taille relative du prélèvement rapportée à la taille minimale $M = S/S_j$

Cette approche de l'analyse des coûts se fait en considérant une variable mais pour les analyses écologiques normales (multivariées) on peut retenir le coût total d'analyse par prélèvement (c_2) et le logarithme de la variance moyenne des caractéristiques jugées comme décisives et qui dictent la taille minimale de S_p

La situation des prélèvements dans le site d'étude peut faire l'objet d'un plan d'échantillonnage tendant à accroître l'efficacité du futur échantillon, c'est-à-dire sa représentation du tout. Selon SCHERRER (1984) l'échantillonnage est l'un des aspects les plus négligés des biostatistiques.

L'échantillon doit théoriquement être représentatif pour une variable du tout qu'il tend à décrire, c'est-à-dire refléter la complexité de la variable étudiée. Dans la pratique, la réalisation de prélèvements lie diverses variables au prélèvement. Celles propres aux données de situation et cotes temporospatiales et celles de la composition connue du prélèvement. Dans ce cas l'échantillon reflète la somme des prélèvements comme représentatifs des variables prises en compte pour décrire le tout.

Exhaustivement l'échantillon doit refléter le tout dans sa complexité (hétérogénéité temporospatiale) et sa composition (= somme des variables). Ceci peut se juger de manière comparative par l'AFC (p. 368) portant sur l'information utile et par le coefficient RV qui permet une sélection des variables efficaces (p. 378).

Notons toutefois que cette appréciation sur l'information apportée par les variables doit elle-même être pragmatiquement pondérée : les démarches analytiques couplent très fréquemment de nombreuses variables de même nature, mais d'"informativité" différente. Par exemple, un relevé de végétation ne va pas exclure les plantes peu "informatives".

Les modalités d'acquisition dépendront des moyens disponibles et des objectifs retenus comme décrits au paragraphe 7.2.3. Elles devront toutefois répondre explicitement au référentiel des données (p. 296), à la nature informelle, cartésienne ou euclidienne des prélèvements (p. 277) et aux exigences d'un échantillonnage, d'une typologie, d'une couverture, ou d'une étude systémique (p. 390).

Il pourra s'agir d'observations sur des systèmes. Ces systèmes peuvent être soit délimités par des discontinuités (exemple : comparaisons prairie-forêt) soit au contraire placés dans une portion d'espace relativement uniforme ou en gradient.

Le dispositif pourra également être expérimental : un acte est appliqué sur une partie du système écologique (coupe forestière à blanc, charges en bétail) et comparé à une situation sans cet acte (= témoin). Dans ce cas, on choisit des caractéristiques permettant de suivre les déformations du système.

Dans certaines études focalisées, on privilégie en outre des paramètres jouant un rôle économique motivant la manipulation (évolution de l'insecte-cible et de la plante-hôte de cet insecte nuisible sous application d'un pesticide, par exemple). Cette dernière focalisation, qui ne devrait pas dispenser d'une étude du système écologique, entraîne le choix d'outils statistiques paucidescriptifs permettant de juger sur ces modalités (avoir suffisamment de données pour pouvoir obtenir une réponse

stochastiquement correcte au-dessus d'un certain seuil de probabilité par rapport à l'hypothèse H_0 , d'un effet nul du traitement, p. 388).

Enfin, la représentativité d'un échantillon de prélévats associés (p. 282) porte sur des variables qui peuvent être hiérarchisées. Ainsi, l'analyse d'un groupe biologique peut fournir à partir d'un échantillon 5 000 individus d'une espèce dont 650 d'une sous-espèce comportant 110 juvéniles dont 15 dans la classe de poids 400-600 mg. Cette analyse simultanée à plusieurs variables cumulatives ne place pas la qualité de l'échantillon sur le même plan selon la caractéristique envisagée, les variations aléatoires seront évidemment beaucoup plus fortes si l'on se réfère au petit nombre 15 plutôt qu'aux 5 000 individus.

Il est à noter que ces cas peuvent être en partie "corrigés" (gain du nombre de données prises en compte) en groupant des données. Il est en effet possible de modifier après échantillonnage la taille de l'échantillon en changeant sa référence, par exemple en accroissant l'espace de référence (groupement d'échantillons issus de sites différents dans l'espace) ou en accroissant l'"instant" de collecte par regroupement à une "date" moyenne des données issues de plusieurs dates adjacentes (exemple : moyenne glissante sur données diachroniques, ...).

Les méthodes d'échantillonnages pour l'acquisition des données font l'objet de nombreuses organisations pragmatiques, souvent discutées et discutables, que SCHERRER (1984) a exposé en détail. Les modalités générales sont :

- l'échantillonnage circonstanciel, c'est le relevé d'une donnée ou de données associées à un prélèvement... répété en n prélévats sans plan d'échantillonnage. Par exemple, avec l'intégration des données en BDR, les collectes fortuites d'espèces rentrent dans ce cas et peuvent aboutir à la constitution d'une couverture,
- l'échantillonnage au jugé portant sur des options privilégiant des caractéristiques typiques. Ces méthodes sont aujourd'hui concrètement optimisâmes. Parmi celles-ci il faut souligner l'importance du jugement sur variables coexistantes communes. Ce jugement part du constat que les variables écologiques décrivant des systèmes permettent leur typologie (p. 367). Certaines des variables définissant un type sont peu coûteuses à collecter tandis que d'autres, que l'on recherche, sont coûteuses. Pour échantillonner des variables coûteuses, on optimise d'abord la sélection des sites et prélévats en observant les variables économiques coexistantes. Ceci se fait simplement, par exemple en observant la végétation pour choisir un prélèvement de sol. Cela peut se faire plus judicieusement à partir d'une étude multivariée, ou paucivariée (régression entre variables coûteuses et économiques) ;
- les échantillonnages à choix raisonné qui s'appuient sur un objectif orientant l'échantillonnage ; lourd inconvénient quand l'objectif est paucidimensionnel (biais orientés par ces choix très sélectifs). Ils deviennent logiques lorsque les analyses multidimensionnelles optimisent ces choix améliorables par approximations,
- les échantillonnages aléatoires collectant les données au hasard et de façon indépendante par rapport à l'hétérogénéité du tout pour pouvoir être extrapolées de façon "neutre" à celui-ci. Prendre au hasard ne doit pas signifier sans savoir où après. Même dans l'échantillonnage aléatoire simple (réellement au hasard), il est indispensable de connaître les repères et cotes des prélévats. Trop souvent, les praticiens collectent des données dans un espace (par exemple après jets d'anneaux), sans situation précise ; ils confondent alors l'acquisition et l'objectif de synthèse (interprétation) et, en violant le principe d'objectivité (p. 298), s'interdisent l'étude des autocorrélations spatiales ou fonctionnelles entre variables.

De nombreux plans d'échantillonnage finalisés, surtout dans les études paucivariées, ont été exposés et sont développés par SCHERRER (1988) qui en donne une bonne bibliographie. Dans ces plans, les prélévats sont sélectionnés en fonction des objectifs et sont choisis aléatoirement à l'intérieur d'un canevas présélectionné pour ces objectifs tels l'échantillonnage stratifié, l'échantillonnage systématique, ... En écologie appliquée devant aboutir à une décision, les objectifs restreints des études, souvent, paucidimensionnelles, permettent leur mise en oeuvre ; celle-ci consacre toutefois le risque résultant d'un objectif de recherche ignorant le système morphofonctionnel où s'inscrivent les variables étudiées.

1.3. Conséquences opérationnelles de l'intelligence Artificielle

7.3.1. Progrès et anachronismes

Les moyens en cours de développement de l'intelligence Artificielle doivent être appliqués à l'écologie. Il ne s'agit pas de tous les développements de l'I.A. (telle la robotique, CHARNIAK et MCDERMOTT, 1986 ; LAUUIERE, 1987) mais des possibilités itératives de gestion, d'interprétation et de critiques de l'information scientifique avec mise à disposition permanente de cette information pour une optimisation de ses usages, y compris appliqués.

Cette mise en oeuvre a commencé à se faire. Elle emploie des outils informatiques de plus en plus puissants, cohérents et complémentaires comme nous l'avons vu aux paragraphes précédents ; les Bases de Connaissances se développeront nécessairement. Elle annonce la fin de la perte actuelle, presque totale, de l'information objective (les DICs) que nous acquérons en permanence sur notre écosphère ; elle prépare des interprétations systémiques à la fois discriminantes et intégrées. C'est la possibilité d'une véritable écologie mettant en oeuvre les deux Processus Répétitifs d'Accroissement des Connaissances.

L'efficacité de l'usage de l'I.A. en écologie exige une rationalisation de l'écologie elle-même. Elle doit impérativement dépoussiérer son approche scientifique, et mettre en oeuvre une méthodologie rationnelle, par approximations successives, de la gestion des connaissances à partir des supputations, des données et modèles flous, probabilistes ou déterministes.

La mise en oeuvre de ces connaissances et la routine de cette élaboration rationnelle permettent d'aborder les domaines où l'écologie, en tant que science et qu'approche globale, a fait (et fait encore) cruellement défaut (3ème partie). Aucun écologue ne peut aborder l'ensemble des démarches requises mais chacun peut contribuer opérationnellement à une approche collégiale (fig. 7-5).

L'organisation rationnelle des données ponctuelles, euclidiennes, qualitatives, quantitatives ou floues permet leur gestion élémentaire en Bases de Données Relationnelles (BDR) dont les Systèmes de Gestion (SGBDR) obligent à une cohérence descriptive totale et à une non redondance de celles-ci. Les SGBDR permettent dès à présent la restitution sur requête des données, sous forme d'ensembles de DICs mais aussi, grâce à l'organisation de programmes-hôtes adéquats, sous forme de DSEs standardisées calculées à partir des DICs.

Ainsi, les SGBDR évolués, quoique heuristiques par les descriptions relationnelles des liens entre données, permettent dès à présent l'interfaçage de modules algorithmiques pour l'obtention de DSEs routinières. Des fonctions peuvent également être décrites sous forme d'algorithmes de plus en plus riches (complexes), c'est-à-dire qu'elles sont potentiellement intégrables "à la suite" d'une BDR en un ensemble d'informations portant sur les données et sur les propriétés de celles-ci.

Cet ensemble complexe ne peut pas en tant que tel accepter les DEPs (p. 267) mais celles-ci peuvent être utilisées, comme source de faits avec une Base de Connaissances. Ces bases peuvent accepter les interprétations causales sur les données en terme d'opinion d'experts (p. 435), dans l'attente de données effectivement dérivées du champ écologique validant le jugement d'expert.

Des suppositions, acceptées au niveau de modèles notamment, peuvent hypothétiquement jouer un rôle complémentaire. Outre un certain nombre de données non écologiques (hors champ) temporairement utilisées (suppositions en modèles partiellement spéculatifs) des connaissances empiriques, non décrites en termes d'acquisition de données —«• BDR —•» interprétation, peuvent être temporairement utilisées comme faits généraux acceptés.

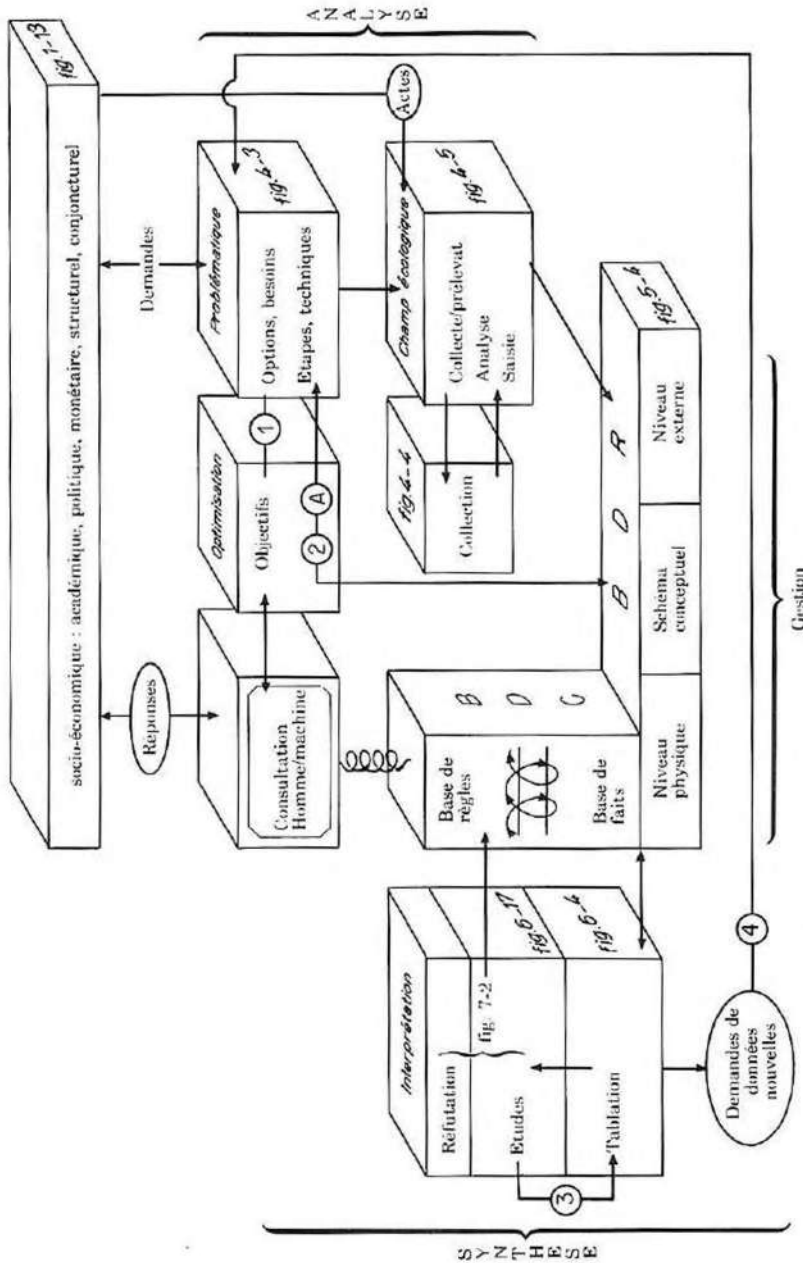


Figure 7-5 - Relations opérationnelles générales en écologie: analyse, gestion des données et synthèse (voir les figures mentionnées et les paragraphes y afférant).

En conséquence, toutes connaissances depuis la plus solide (objectivement observée par une DIC) à la plus subjective (opinion d'expert invérifiable) peuvent être utilisées de façon explicite, donc criticable, donc améliorable en permanence. Les données étant gérées en BDR, les connaissances (même fausses) en BdC et les intégrations systémiques, système par système, en ISTECs descriptibles en Base de Connaissances.

Nous avons détaillé tout au long des chapitres précédents l'écologie moderne par des étapes résumées aux paragraphes 7.1. et 7.2. Les "raisons historiques, qui pèsent encore très lourd dans l'état actuel de l'art", ont pour conséquences de très nombreuses difficultés, considérées souvent comme fondamentales. Celles-ci ont surtout pré-existé à la situation actuelle et sont aujourd'hui anachroniques.

Ces "problèmes" ont été ou bien clairement posés comme tels, ou encore "contournés" par des substituts a-scientifiques, voire anti-scientifiques, par exemple présentés comme scientifiquement valides à l'aide d'un habillage abscon.

Les approches sectorielles des diverses disciplines qui concourent à l'écologie - difficilement conciliables entre elles - ont créé une gêne croissante que les écologues ont tenté de surmonter par des théories holistes en différant les études, en les plaçant hors du champ écologique ou en usant de données inadéquates pour valider des modèles spéculatifs. Ces spéculations, souvent présentées comme scientifiquement fondées, ont, avec les très réelles difficultés matérielles d'intégration, conduit à des "contradictions" qui apparaissent, à partir d'une approche écologique objective et méthodique, comme anachroniques.

Cette situation mérite d'être décrite brièvement pour en mieux prendre conscience afin d'en réduire les effets pervers tant vis-à-vis de l'écologie fondamentale qu'appliquée, car il s'agit en définitive de carences plus ou moins occultées par divers moyens.

Elle oblige à expliciter les pratiques générales de l'écologie (ci-dessous) vis-à-vis de ses objets d'étude, les systèmes écologiques (p. 452) et les données (p. 453) et à éliminer les anachronismes (p. 455).

7.3.2. Théories écologiques et systémiques opérationnelles

La nécessité de maîtriser le complexe a conduit très tôt les chercheurs naturalistes et écologues à rechercher de grands concepts unitaires, des "super-organismes", des outils intellectuels maîtrisant le complexe. Ces approches, visant à une certaine globalité effectivement cohérente avec la définition même de l'écologie, souffraient de ne pas être opérationnelles. Ainsi sont nés bien des concepts, tel celui d'écosystème.

Cette volonté de généralisation, qui a joué un rôle très positif en orientant les recherches sur le global, joue aussi un rôle négatif en produisant des modèles prématurés et déformés

1) par la vision humaine de la nature (au sens de la vision de l'oeil) : une vision essentiellement continentale et épigée et partiellement aquatique. Les modèles conceptuels d'écosystèmes des travaux classiques en écologie sont essentiellement limités aux parties aériennes ou aquatiques,

2) par le biocentrisme dominant l'écologie (p. 201). Faute de possibilités d'intégration, c'est la partie biologique des systèmes écologiques qui fut privilégiée au point d'éliminer quasi totalement les propriétés physicochimiques abiotiques et leurs conséquences dans les modèles conceptuels,

3) par une prise en compte encore plus réduite : celle des seuls domaines biologiques bénéficiant d'études de spécialistes. Par exemple chez les animaux, malgré leur rôle fonctionnel marginal, les vertébrés sont usuellement survalorisés par rapport à des organismes beaucoup plus importants mais rejetés dans un mystérieux compartiment de "décomposeurs". (Ce biais n'est pas nouveau, voire pour la période 1800-1860 : Laurent, 1987).

A cet égard, le modèle d'ODUM (p. 163), qui a joué un rôle didactique essentiel, cumule ces déformations (très normalement pour son époque : 1957).

Le fait que les naturalistes et écologues accumulent, dans les domaines restreints de leurs spécialités individuelles, des observations interprétées au coup par coup avec des moyens très limités d'intégration, conduit à un sentiment d'impuissance pour inscrire ces approches partielles dans un ensemble et pour mettre de l'ordre dans cette masse de connaissances. Celle-ci n'est "synthétisée" que sous forme de volumineux ouvrages décrivant qualitativement une masse impressionnante de connaissances où l'exercice scientifique critique total est concrètement impossible.

Cela conduit certains auteurs à réclamer avec force une théorie écologique (par exemple Margalef, 1982, chapitre 27, *Theoria ecológica*) ou d'autres à souligner nettement cette propension à la théorisation (BarbaDLT *et al.*, 1980), même si ce n'est qu'à partir d'approches écobologiques partielles.

Il n'est pas ici question de nier le rôle de la théorisation en écologie, mais d'en souligner malgré sa nécessité, les risques, et surtout d'indiquer que celle-ci peut être aujourd'hui réalisée beaucoup plus constructivement.

Deux propriétés essentielles doivent être respectées en écologie opérationnelle et ceci quelle que soit l'étendue du domaine couvert par une théorie écologique.

1) Elle doit être applicable, c'est-à-dire vérifiable sur un ou plusieurs objet(s) concret(s). Cela va du concept d'un "objet écologique", tel le concept "abstrait" d'écosystème qui de fait s'applique à une infinité de modalités, tel le concept abstrait de "fonctionnement d'un syntégon" qui également est applicable à certains ISTECS lorsque les techniques de contrôles existent (p. 406 ; REAL).

2) Elle doit être adéquate, c'est-à-dire exhaustive dans son étendue d'application et ne doit pas partir de propriétés excluant une portion du domaine prétendument couvert. En d'autres termes, il faut une adéquation entre le contenu de la théorie et le domaine où elle s'applique. A cet égard, de nombreuses théories fondées exclusivement sur des approches biologiques sont extrapolées au champ écologique en négligeant sa composante abiotique. Tels les "bilans de flux énergétique" et débits d'éléments chimiques de nombreuses estimations d'"écosystèmes" réduits en fait à des biocénoses.

En développant une systémique écologique explicite, il est par contre indispensable de développer une théorisation opérationnelle réfutable (p. 105).

En pratique, les théories, qui ont devancé de beaucoup les aptitudes de saisie de données et de vérifications, ne peuvent qu'être intellectuellement stimulantes mais nullement opérationnelles.

Par exemple, la transposition des concepts cybernétiques de la théorie de l'information sur "écosystème" effectuée par MARGALEF (1968) n'est exposée que comme hypothèse de travail vis-à-vis de la seule biocénose. Dans "Ecología", le même auteur (1982) réduit de fait son domaine d'application aux systèmes prédateurs-proies à titre de perspective, il est d'ailleurs douteux que les paramètres requis soient mesurables dans le champ écologique et que le contrôle de ce modèle soit opérationnellement possible. Ceci ne lui retire pas sa valeur d'hypothèse abstraite pouvant inspirer des démarches spécifiques portant sur des objets concrètement mesurables.

Faute d'avoir effectué cette sélection bien des problématiques écologiques majeures se sont appuyées sur des concepts visionnaires. Elles n'ont pu être testées rigoureusement et n'ont conduit qu'à un "détournement de moyens" au profit de recherches para-écologiques (p. 452), à la mode, puis à une certaine déception.

Z.3.3. La paraécologie

Le domaine de l'écologie étant bien défini et ses moyens d'élaboration donc de progrès étant clairement dégagés, il est nécessaire de revenir brièvement sur les connaissances acquises en empruntant méthodes et concepts à des disciplines connexes, voire interséquentes avec l'écologie.

La difficulté provient du fait qu'une connaissance peut être parfaitement correcte au plan scientifique général (acquise dans des conditions bien définies et pouvant se prêter à vérification-réfutation dans ces conditions) et être cependant impropre à une utilisation écologique (= inadéquation au champ écologique).

Il est tout à fait légitime d'un point de vue physiologique, biochimique ou physique d'isoler du champ écologique quelques éléments et de les soumettre à des conditions qui n'existent peut-être jamais dans ce champ au niveau de ces éléments, mais qui permettent de mettre en évidence des propriétés intrinsèques à ces éléments. Beaucoup de processus ont été ainsi mis en évidence, en allant des propriétés respiratoires des organismes, à la fixation biologique de l'azote ou à de nombreuses réactions chimiques.

De telles recherches ont le mérite considérable de mettre en évidence des propriétés qui potentiellement peuvent se produire dans le champ écologique.

Le problème est tout différent lorsque l'on cherche à connaître l'importance effective d'un processus dans le champ écologique ; c'est-à-dire son importance réelle dans l'écosphère.

Si dans un premier temps, les recherches faites hors préoccupation écologique ont fait abstraction des conditions de milieu, ou plus exactement sont créées sans référence au champ écologique, il n'est plus possible de le faire dans une recherche proprement écologique. C'est la différence entre potentialité et réalité (p. 31).

Pour qu'une propriété potentielle soit acceptable, il suffit qu'elle respecte lors de sa mise en évidence une démonstration scientifique réfutable. Pour que l'importance de cette propriété soit connue dans l'écosphère, il faut en outre qu'elle soit mesurable ou/et contrôlable dans le Champ écologique.

Il est donc parfaitement légitime de mettre en évidence des processus potentiellement possibles dans l'écosphère et de reconnaître par ailleurs que cette indication ne nous renseigne pas sur l'importance de ce processus dans celle-ci.

Il se trouve que les dispositifs artificiels développés pour mettre en évidence des processus en conditions choisies par l'homme (et non depuis le système écologique) sont la première étape, la plus "facile" en ce sens qu'ils laissent libre du choix des conditions expérimentales de mise en évidence. Très souvent, dans ces conditions, les acquisitions numériques sont nombreuses et la formalisation mathématique relativement aisée.

La tentation est alors très forte, "faute de mieux"¹, en attendant de véritables quantifications du processus en cause dans le champ écologique, d'extrapoler ces quantifications au champ écologique.

De telles extrapolations sont légitimes comme hypothèses mais seulement comme hypothèses.

Dépendant il faut bien reconnaître que cette séparation pourtant très claire et facile (les données ne proviennent pas du champ écologique !) n'est que rarement soulignée, ou, si elle l'est initialement, elle est perdue de vue au cours des "synthèses" successives. Ainsi une hypothèse devient une thèse.

Ce processus de confusion hypothèse/thèse prend une dimension particulièrement importante lorsque, d'une part une série de calculs hypothétiques basés sur des suppositions s'enchaîne et d'autre part, que toute une communauté de chercheurs pratique en routine ces hypothèses-comme-des-thèses. Les suppositions deviennent si habituelles qu'elles en sont "normalisées" et ne sont plus énoncées comme telles, par exemple, l'extrapolation au champ écologique d'un taux respiratoire

mesuré dans un respiromètre est banale (LUXTON, 1982). Ainsi, des ouvrages "synthétiques" d'hypothèses peuvent être produits.

Cette démarche largement hypothétique est très fréquente en "écologie" ; ceci s'explique par le caractère encore juvénile des connaissances proprement écologiques et, en leur absence, à l'évocation des supputations s'y substituant. On observe ainsi des recherches portant sur des populations hypothétiques (ou d'estimations biaisées) auxquelles on attribue des propriétés extra-écologiques dans des modèles conceptuels ne recevant qu'un nombre restreint (voir nul) de données écologiques sans aucune possibilité de réfuter les résultats (p. 25). J'ai dénommé (BOUCHE, 1977a) cette démarche mimant "en parallèle" l'écologie, la para-écologie, non pas pour condamner de telles constructions intellectuelles, mais pour distinguer scientifiquement et clairement de l'écologie ce domaine hypothétique invérifié qui est trop souvent présenté comme un acquis écologique et constitue une part importante de la littérature "écologique".

La para-écologie, présentée comme écologique, a des effets pernicioux importants.

- Elle est un fondement souvent erroné sur lequel des conséquences et déductions sont établies (par exemple, mouvement de contaminants, conséquences de l'érosion, étude de lutte biologique, bilan des échanges terrestres de CO_2 , etc.). Ces "fondements" s'avèrent inutilisables, car par essence sans rapport au réel, il s'en suit un discrédit pour les études écologiques.

- En masquant l'absence de connaissances par des pseudo-acquis, elle ne permet pas une organisation saine des priorités des recherches pour réduire les méconnaissances.

- En permettant d'alimenter sans référence rigoureuse au champ écologique des "modèles" conceptuels arbitraires, elle permet une inflation de pseudo-théories brillantes, en apparence fondées, et qui, par leur facilité, abondent et occultent les acquis laborieux et sérieux. Pratiquement elles excluent les rares travaux réfutables, car ceux-ci sont beaucoup plus fastidieux et ternes.

En conséquence, l'une des priorités de l'écologie serait d'assainir sa présentation en réduisant son domaine aux acquis réels relatifs à l'écosphère, c'est-à-dire compatibles avec le champ écologique. Il sera ensuite possible d'organiser l'acquisition des données les plus nécessaires à la compréhension des systèmes écologiques concrets, à gérer les données dans des SGBDR dont la structure implique une référence obligatoire au champ écologique (comme ECORDKE) et à intégrer ces connaissances dans des processus de modélisation et de Base de Connaissance où les suppositions sont bien distinguées des prédicats validés et où les degrés d'écovalidation sont clairement connus (p. 417).

7.3.4. L'inadéquation des données

En adoptant des problématiques fondées sur des théories inapplicables et inadéquates, en pratiquant la para-écologie sans objet comme "science" parallèle à l'écologie, la démarche de l'écologue n'est pas satisfaisante et très souvent celui-ci "cherche des données" pour documenter sa démarche "théorique" illustré par le modèle spéculatif qu'il a construit.

Il en va ainsi de très nombreuses supputations, "théoriquement" intellectuellement brillantes, mais de fait nées indépendamment des données auxquelles on tente de les appliquer.

Par exemple, l'adoption du modèle démographique, développé pour les populations humaines où les individus sont individuellement identifiés et dont les âges sont connus avec précision, pour interpréter des populations animales (ou végétales) où ces variables sont usuellement ignorées s'avère extrêmement difficile. Ce point a été discuté en détail par HADJIBIROS (1978) qui montre les limitations des modèles démographiques classiques de LEWIS (1942), LESLIE (1948) et de LEFKOVITCH

(1965) avant de proposer une présentation plus adaptée... qui suppose toutefois des données non biaisées vis-à-vis d'animaux ayant une succession de stades de croissance reconnaissable.

Hadjibiros est alors conduit à tester ce modèle sur une population "artificielle", de telles données n'étant pas à sa disposition par carence des techniques d'acquisition, seules des données biaisées, dites "semiquantitatives", (voir ci-dessous) étant accessibles à cet auteur.

Nous touchons là à une autre tendance spontanée : l'usage de données inadéquates (p. 288). Il est très tentant d'appliquer à une démarche (modélisation) applicable à des données théoriquement imaginées (dans notre exemple ci-dessus, le dénombrement à travers le temps de toutes les écophases d'une espèce d'acarien) à des données concrètes obtenues par une acquisition inadéquate à cet usage.

Cela peut être des données qualitatives décrétées "quantitatives" ou à l'inverse, des données quantitatives, ayant souvent nécessité un effort d'acquisition considérable, appliquées à des domaines pour lesquels elles sont inappropriées. A cet égard, le qualificatif "semiquantitatif" appliqué à des données est révélateur d'une inadéquation foncière mais variable suivant les circonstances.

a) Cela peut être l'utilisation d'une méthode d'acquisition biaisante ou inopérante. Ainsi l'extracteur de Berlese (1905) (développé par ce zoologiste à des fins d'inventaire qualitatif des taxons) a été utilisé, avec bien des variantes, pour quantifier certains peuplements d'arthropodes du sol (TIJLUJEN, 1917 ; MACFADYEN, 1951 ; Vannier, 1970) alors que de toute évidence son principe (les animaux quittent eux-mêmes le sol sous l'effet d'un stimulus répulsif) implique que 1) les animaux soient toujours mobiles, 2) que le sol se prête à leur mobilité, 3) que ces animaux, en général, "acceptent" de sortir de leur milieu.

Evidemment, ceci est extrêmement dépendant de variables environnementales (Vannier, 1970) ou physiologiques propres à chaque écophase de chaque espèce (Atkins-Henriot, 1977), etc. En général, les données quantitatives obtenues sont une fraction des quantités effectives du peuplement du prélevât. Le rendement d'extraction étant aléatoire car non expliqué (= trop de variables incontrôlées).

b) Ce peut être l'utilisation d'une donnée quantitative de nature inadéquate.

Ainsi, l'utilisation de trappes (pots-pièges, pot Barber, trappes à double pot, BOUCHE, 1976, etc.) a pour effet de capturer les animaux tombant dans ces trappes : il s'agit d'une cinèse (= débit du nombre d'individus/temps/cm² — surface de collecte). Cette cinèse est une fonction usuellement dépendante de l'état du peuplement (compartiment), du comportement des écophases du peuplement (mobilité intrinsèque du stade de l'espèce) et des facteurs d'ambiance, dont la température, ayant un rôle direct sur la mobilité des poïkilothermes et indirect sur les homéothermes.

Tenter de considérer cette cinèse comme des indices de l'un des éléments influençant cette Cinèse est fallacieux mais fréquent. Très souvent, ces données de trappes sont proposées comme données "semiquantitatives" d'estimation de l'état du peuplement.

c) L'inverse est vrai : la différence entre l'état maximal et l'état minimal d'une population est souvent considérée comme sa "production" de tissus élaborés (cinèse) (p. 166). Ainsi confond-t-on vitesse d'une voiture et poids du véhicule !

7.3.5. Eaux-problèmes ou dualismes anachroniques

Par nature, l'écologie discriminante interdit des "dualismes" opposant souvent, parfois de façon très négativement conflictuelle, des "démarches" scientifiques et techniques.

En éliminant, au stade de l'étude proprement dite, le discours et en rendant transparent la nature des données en BDR, et les modes d'interprétation en BdC mais surtout en rendant possible une réutilisation-complémentation permanente des données et modalités de choix et traitement, il est possible d'assurer les deux Processus Répétitifs d'Accroissement des Connaissances. Ainsi la comparaison typologique et la systémique itérative interdisent la sclérose des interprétations subjectives. Tout au plus, peut-on noter des différences d'appréciation entre deux études mais leur nature étant connue, il n'est pas possible d'en opposer stérilement les conclusions.

Cette propriété a l'énorme avantage de lever les difficultés qui souvent divisent ou déforment les études écologiques et qui apparaissent de ce point de vue, et seulement aujourd'hui, comme des anachronismes artificiels que nous allons énumérer ci-dessous. Ces anachronismes, ayant souvent exprimé des oppositions duales, seront présentés sous cette forme.

1. Réductionnisme/holisme

La recherche de causes sous-jacentes à un niveau -1 conduit à étudier un système au niveau -2 puis une partie du niveau -3 expliquant -2, etc... Cette focalisation permet d'atteindre en profondeur, souvent en détail, une connaissance qui paraît à certains d'autant plus sûre qu'elle est profonde.

Les cas particuliers ainsi privilégiés par les options (car chaque approfondissement laisse de côté des caractéristiques), sont alors souvent perçus par ceux connaissant bien l'ordre 1 comme des sous-systèmes ininterprétables faute d'avoir une perception cohérente de tous les sous-systèmes d'ordre 2, 3, 4, ..., n. La profondeur de la réduction apparaît comme une démarche ayant privilégié arbitrairement un micro-domaine. Cette opposition peut prendre une allure caricaturale faisant omettre l'essentiel pour rechercher l'essence (cf. FLEURY, 1988) et entraîne des études biotechnologiques coûteuses d'application nulle (p. 527).

Réciproquement, une étude de niveau 1 peut apparaître comme insuffisamment située dans un ensemble plus vaste, comme un sous-système marginal du niveau 0, lui-même partie d'un ensemble plus vaste jusqu'à l'écosphère. D'où, pour certains, une approche tendant à regrouper les connaissances des niveaux inférieurs en ensembles plus vastes (synthèses) marquant la volonté de se situer d'emblée dans des concepts généraux (holistes) dont les fondements sous-jacents peuvent paraître tout à fait arbitraires à ceux qui perçoivent concrètement une partie des niveaux inférieurs.

De fait, il existe des recherches "fines", particulières, qui semblent ne plus avoir de référence avec un système écologique et il existe des modèles holistes qui reflètent plus la vision abstraite et arbitraire de modélisateurs que les objets concrets des études écologiques.

L'adoption de l'écologie discriminante (p. 422) exclut par sa nature ces extrêmes coupés du réel et ordonne les données du champ écologique pour ce qu'elles sont ; elle permet de dégager les éventuelles faiblesses de données analytiques trop particulières ou dispersées (sans les perdre toutefois, dans l'attente d'études complémentaires) et la faiblesse explicative d'observations impliquant une analyse plus détaillée. Chaque niveau d'étude assure son apport et exprime ses limites en toute neutralité si les données sont écologiquement référées (p. 296).

2. Méthode et spontanéité

L'information écologique peut apparaître complexe ; elle l'est souvent apparemment car elle exige une méthode d'acquisition des données décrite dans le chapitre IV. Le grand nombre de prélèvements, fournissant des données sur des caractéristiques multiples et diverses, peut conduire à des protocoles d'acquisition ou/et à des procédures de traitement très lourds.

A l'opposé, l'écologue, ou le naturaliste, peut faire des observations fortuites sans aucun plan d'échantillonnage et certains pensent que ces informations fortuites même rares sont plus importantes que les conclusions souvent limitées des études lourdes. D'autres au contraire invoquent le caractère isolé, non reproduit des observations fortuites et leur fragilité liée à l'aléatoire.

Il y a encore ici faux débats. Les données acquises quelles qu'elles soient peuvent être recombinaisonnées en ensembles d'informations si, et seulement si, elles sont situées dans le champ écologique par leur référentiel.

Que la présence d'une espèce soit constatée en un point de l'espace fortuitement au cours d'une promenade d'un taxonomiste ou de façon intentionnelle à l'intérieur d'un plan d'échantillonnage important, cette présence existe si la donnée est référée. Elle est interprétable dans le champ écologique à la mesure des informations qui lui sont reliées (au moins les coordonnées géodésiques du lieu en ce qui concerne ECORDRE, p. 321). Il n'y a pas à confondre - la qualité de la donnée (identification correcte de l'espèce dans le cas de l'exemple choisi) avec - la "qualité" de l'ensemble à l'acquisition - puisque celui-ci ne sera pas forcément l'assemblage (p. 360) au traitement.

Toute donnée écologiquement référée, même fortuite, est utilisable.

3. Science/technique

Une certaine dichotomie intellectuelle tend à distinguer, voire à opposer, les démarches scientifiques, essentiellement intellectuelles et conceptuelles, aux démarches techniques, essentiellement concrètes. D'aucuns privilégient les démarches brillantes et abstraites tandis que d'autres prônent l'élaboration de techniques concrètes. L'écologie discriminante interdit ce dualisme arbitraire car elle est

a) scientifique en permettant une critique continue de son contenu et l'énoncé d'hypothèses précises ou/et générales dans le cadre précis de systèmes eux-mêmes sous-systèmes explicites,

b) technique, 1) car l'acquisition de données réellement adéquates au champ écologique requiert souvent un développement technique préalable, en tous cas un choix critique pour toute acquisition, gestion et interprétation des données, 2) car les systèmes sont constitués d'ensembles qui ne sont connectés, classés et interprétés que par des outils informatiques actuellement, disponibles et dépendant étroitement de ces moyens techniques.

4. Descriptions/Interprétations

D'aucuns tendent à distinguer, voire à opposer une écologie descriptive, accumulant des multitudes de faits, à une écologie explicative (souvent expérimentale). Cette distinction n'a en écologie discriminante aucun fondement ; toute série de données peut être présentée de façon descriptive et même faire l'objet d'analyses statistiques descriptives (p. 367) décrivant de façon sophistiquée et explicative les faits. Réciproquement, les processus explicatifs (en fait sous-ensembles de l'ensemble à expliquer) sont tout à fait étudiables de la même manière dans le Champ écologique. Enfin, les manipulations expérimentales, produisant des données écologiquement explicites (p. 272) y compris les conditions d'expériences liées à ces données (p. 443), conduisent à des descriptions explicatives. Par contre des données expérimentales, descriptives ou explicatives, non réfutables os le champ écologique n'ont qu'une valeur limitée.

5. Grande/petite échelle

Il est symptomatique de voir évoquer des "problèmes d'échelles" en écologie, et de constater que ceux-ci sont toujours de faux-problèmes résultant notamment du biocentrisme ou de confusions conceptuelles (par exemple Lawton, 1987, commentant O'NEIL et al., 1986, p. 91, 94, 107, 201).

Toute donnée écologique étant référible au champ écologique est *ipso facto* placée dans toutes échelles spatiotemporelles égales ou supérieures aux cotes de son prélèvement. Ce champ forme un continuum par rapport auquel il est possible de synthétiser des données de sous-systèmes vers des systèmes plus globaux et réciproquement de localiser le niveau où des données plus détaillées ont valeur explicative. A partir du moment où une donnée est écologiquement référée celle-ci informe, à la taille de son prélèvement près, dans l'espace-temps.

L'intérêt récent pour les "problèmes d'échelles" provient selon Di Castri et HADLEY (1988) de trois causes intriquées et liées : 1) d'importants processus environnementaux apparaissent à des échelles temporo-spatiales plus grandes que celles usuellement étudiées par les écologues, 2) les décideurs sont également intéressés à des échelles spatiales inhabituelles aux écologues, 3) les écologues ont sous-estimé les conséquences du réductionnisme temporo-spatial. Il n'y a qu'inadéquation de pratiques, de toute façon très limitées à une échelle non intégrée, ce que les moyens modernes suppriment, mais ce que les écologues ne pratiquent pas encore.

On constate qu'il s'agit d'un problème de vacuité des connaissances, ou d'études inadéquates (p. 453) mais aussi d'indisponibilité de données objectives (pas de gestion intégrée en BDR) interdisant le zoomage permis par l'écologie discriminante (p. 422) résolvant ces changements d'échelles temporo-spatiales.

Le zoomage selon les besoins, en suivant un, deux ou trois référendaires (temps, espace et composition) sur données objectivement référées au champ écologique, permet les interprétations répétées des acquis de la globalyse. Les diverses disciplines, souvent encore isolées par leurs focalisations restrictives sur une partie des référendaires, notamment temporo-spatiaux mais aussi compositionnels (= objet d'étude) (voir Di Castri et Hadley, 1986, 1988) contribuent (devraient contribuer) à cette connaissance par la mise en commun de leurs acquis objectifs.

La gestion intégrée des DICs sur les trois référendaires est aisément réalisable si les données sont objectives vis-à-vis du champ écologique. Les blocages conceptuels des disciplines résultant des objectifs initiaux d'acquisition de DICs peuvent être dépassés.

Cela ne signifie pas que toutes les démarches développées dans ces disciplines soient utilisables ; les exigences de scientificité (= réfutabilité) et d'objectivité (= référentiel à l'écosphère) étant souvent omises dans celles-ci. L'intégration écologique *a posteriori* révèle alors de fausses "difficultés de changement d'échelles" (*sic*) qui ne sont en fait que des tests d'invalidation. Il ne suffit pas de prôner un amalgame "interdisciplinaire", il faut rigoureusement respecter les conditions découlant directement de la définition de l'écologie (p. 21) dont celles d'objectivité, de scientificité et de connexité systémique.

Les "problèmes d'échelles" n'existent donc que de trois manières :

- a) les données ne sont pas écologiques et ne peuvent donc s'inscrire dans le champ écologique (= données inadéquates),
- b) les données font défaut et restent donc à acquérir (= vacuité des connaissances, p. 442, 482),
- c) les données sont indisponibles par gestion archaïque.

Par contre, dès qu'il y a DICs écologiques, les changements d'échelle se font sans difficulté par assemblage adéquat à chacun des choix de traitement retenus.

Pur exemple, dans ECORDRE chaque donnée liée à son prélèvement est repérée par son lieu (ou sa placette dans ce lieu) (p. 321). L'édition automatique, des cartes par exemple, permet de figurer à la demande les données *ad hoc* à une échelle spatiale choisie en fonction des besoins d'étude environnementale ou de demandes des décideurs.

5 bis) Objectifs focalisés/généralisés

Très proches et techniquement identiques aux problèmes des échelles, les objectifs de recherche sont souvent jugés en fonction de leur focalisation "précise" opposée à générale, "imprécise". Ici encore ce jugement de valeur paraît arbitraire, c'est la qualité des données acquises ou disponibles au niveau du champ écologique qui permettra éventuellement une bonne interprétation. Un niveau global peut alors être préférable à un niveau focalisé ou inversement.

5 ter) Discontinuité/continuum

La recherche de discontinuité dans les continuums écologiques hétérogènes est une démarche fréquente pour attribuer des limites d'extrapolation à des domaines du champ écologique. Ces discontinuités sont relatives à l'échelle d'étude et relèvent aujourd'hui d'études objectives (p. 368) permettant, par classification factuelle, de nuancer les coupures hiérarchisées établies. La perception de continuum ou d'écotone est conventionnelle (p. 39) en fonction d'opinions variant à chaque échelle et objectif d'interprétation.

6. Connaissances sophistiquées et acquis vulgaires

L'écologie couvre un vaste domaine où les études, initialement très cloisonnées et mettant en oeuvre des outils et des démarches très diverses, se côtoient.

Très souvent, un jugement de valeur a-scientifique, voire anti-scientifique, se superpose en célébrant les recherches "de pointe", à la mode, ésotériques, ou effectuant des prouesses d'analyses réductionnistes. A l'inverse, l'acquisition de données triviales, même si une véritable habileté est indispensable notamment pour que ces données soient des DICs réellement écologiques, mettant en oeuvre des outils ordinaires voire anciens (de la loupe à main à la bêche) nécessitant parfois peu de crédits pour de nombreuses données, est considérée comme "archaïque" et reste péjorativement associée aux travaux anciens qui ont pu effectivement mettre en oeuvre ces techniques simples.

Si l'écologie modifie l'approche des problèmes par une méthodologie explicite globale (p. 421, 428), elle ordonne les études, en mettant en oeuvre des outils anciens et modernes, par rapport aux seules informations objectives souhaitées. L'observation d'un papillon capturé au filet peut très bien être gérée dans une BDR dont (présentement) les SGBD nécessitent de très gros ordinateurs sophistiqués et la mesure d'un débit d'isotope dans un compartiment (ex : lombricien) d'écosystème important nécessitent à la fois la bêche, pour capturer des lombriciens, et un spectromètre de masse de très grande précision.

De même l'étude de l'impact des itinéraires techniques agronomiques sur une parcelle exige un esprit analytique très exercé, parvenant à s'affranchir des connotations agronomiques pour extraire les actes agissant sur le système réel (p. 272) et à établir une connaissance de l'agro-écosystème étudié (p. 91). Elle ne requiert que des outils très frustes d'acquisition de données, mais implique une systémique critique très élaborée.

Les jugements de valeur péjoratifs ou admiratifs sur des "signes extérieurs" de "scientificité ou technicité" prouvent essentiellement une carence d'intégration par l'absence de démarche écologique et scientifique ; plutôt que d'avoir l'aptitude d'opiner sur le fond, des impressions externes servent de fondement aux "jugements". Il faut une solide ignorance de la démarche scientifique pour confondre qualité de la recherche avec ésotérisme et appareillage coûteux.

7. Ecologie fondamentale et appliquée

De la même manière, certains esprits estiment beaucoup plus valorisant de faire des recherches "fondamentales" affichées comme bases de la science écologique et d'autres esprits considèrent comme seules utiles les recherches clairement finalisées à des fins économiques (agronomiques, environnementales, halieutiques, ...). De toute évidence, tous les systèmes écologiques subissent l'influence de l'homme par ses actes omniprésents ; tendre à s'en affranchir, à des fins fondamentales, revient à étudier des situations souvent si marginales qu'elles en sont extrêmes et écartent ainsi ces études "pures" des situations écologiques les plus fondamentales et les plus généralisables. De même, les recherches finalisées ne peuvent ignorer les conséquences des actes sur le système écologique en cause sous peine de réponses partiales parce que partielles : les actes humains agissent sur des systèmes qui ne peuvent, en tant que tels, être ignorés par réductionnisme "finalisé".

En fait, le vrai risque est d'effectuer des recherches "fondamentales" ésotériques et sans relation réelle avec le champ écologique et, d'un point de vue finalisé, de produire en raison de leurs "perspectives" trop ponctuelles des RANAS (Recherches Appliquées Non Applicables) <<**cette recherche n'est ni de la recherche de base, ni de la véritable recherche appliquée**>> (CALLON, 1986).

Ici encore, la carence d'intégration, la non inscription des objectifs, nécessairement focalisés, dans la globalyse par une systémique critique objectivée expliquent ces attitudes a-scientifiques.

Toute observation sur l'écosphère, dans le champ écologique apporte des connaissances sur son état localisé ou généralisé, selon les échelles spatiotemporelles et la composition choisies. Toutes reflètent l'existence de l'homme dont les actes interviennent nécessairement dans toute interprétation,

- soit sans organisation des données privilégiant les aspects économiques : c'est l'écologie dite fondamentale,
- soit avec référence et organisation socio-économiquement orientées : c'est l'écologie appliquée.

Les options d'acquisition (p. 267), la sélection des ensembles (assemblages, p. 360) peuvent refléter des préoccupations par rapport à un contexte économique (= appliqué) ou répondre à des motivations plus exclusivement intellectuelles (fondamentales) mais la méthodologie générale reste exactement la même. Ce sont seulement les considérations non écologiques qui distinguent, au niveau des seules problématiques, les deux domaines fondamentaux ou appliqués.

Les données écologiques quelles que soient leurs motivations initiales d'acquisition (p. 28) peuvent être interprétées dans les deux objectifs qui se confondent souvent car, par définition de l'écologie, et par nature du champ écologique, ces deux optiques s'imbriquent en écologie discriminante.

7.4. L'organisation écologique

7.4.1. Inconfort intellectuel, théorie et rigueur

Tout écologue s'intéressant aux progrès de la connaissance fondamentale de l'écologie et tout technicien agissant, ou élaborant des moyens d'action, dans le champ écologique sont placés devant un dilemme désagréable et pernicieux.

Le premier, principalement fondamentaliste, est contraint pour être personnellement opérationnel d'être spécialiste : il n'est qu'ornithologue, botaniste, pédologue, ou ... spécialiste de vers de terre (comme l'auteur de ces lignes). Concrètement il travaille sur un objet encore plus étroit, souvent une espèce animale, végétale ou chimique. Certes, il pourra choisir de temps en temps de changer de matériel mais lorsque, écobiohistorien, il aura étendu son travail à quelques espèces ce sera tout. Et encore, ce travail ne porte-t-il que sur quelques propriétés, sur quelques états, plus rarement sur quelques cinèses, relatifs à cet objet d'étude. Le spécialiste peut encore, changeant de niveau d'observation, appréhender de façon relativement globale, par exemple comparer de nombreux profils de sols pour une cartographie pédologique : les données acquises en chaque point étudié sont alors nécessairement très limitées par rapport au système réel.

Le "fondamentaliste", et ce peut être parfois un autre volet de son activité, peut par ailleurs spéculer sur les grandes théories écologiques, chercher quelques grands principes unificateurs, évoquer quelques paradigmes. Certains, perdant tout contact avec les données, chercheront à élaborer ces théories au service de la communauté écologique. C'est répondre au besoin, parfaitement légitime et scientifiquement justifié, de rompre avec l'isolement du spécialiste. Les colloques, réunions ou simples discussions répondent à cette attente... parfois déçue, parfois conflictuelle tant la portée intellectuelle et la compréhension restrictive du réel de chaque spécialiste est bornée par les limites du travail possible par chacun.

L'inconfort du technicien n'est pas moindre. Il sait élaborer ou mettre en oeuvre un outil spécifique physique (pelleteuse, charrue, tronçonneuse, chalut, ...), chimique (feu, pesticide, engrais, radionucléide, médicament, ...) ou biologique (nouvelle espèce pour la lutte biologique en culture, variété sélectionnée ou génétiquement manipulée, bétail, ...). Mais il n'a concrètement qu'une perception radicalement restreinte des conséquences de la mise en oeuvre de cet outil sur les systèmes écologiques. En fait, en pratique, il n'appréhende que des effets presque exclusivement focalisés sur la finalité économique qu'il s'est assigné et doit "fermer les yeux" sur le reste ; presque tout.

Ces inconforts intellectuels peuvent évidemment être psychologiquement surmontés, en se satisfaisant de quelques critères *ad hue*. Lorsque le contexte le permet, il est possible de se regrouper en associations, corps de métier, ou groupes de pression et de développer à leur niveau une autosatisfaction et une certaine émulation autoprotectrice.

Des théories aussi grandioses que non contrôlables, sont affirmées ; ainsi de simples hypothèses sont évoqués comme paradigmes au nom d'une scientificité incantatoire, sans définir rigoureusement l'objet et les moyens d'études...

Ne voit-on pas les techniciens proposer des "procédés d'avenir" ou mettre en oeuvre des moyens sur des systèmes écologiques méconnus en toute tranquillité apparente ?

Ne voit-on pas ces attitudes superficielles s'accompagner très souvent de la recherche d'un parallèle, si besoin par la seule image d'une analogie, parfois plaisante, avec les disciplines ayant une haute réputation (telle la mathématique ou la physique) ?

Ne confondons-nous pas un traitement mathématique lourd avec une preuve alors qu'il n'est qu'un enchaînement logique pouvant porter sur des données erronées, de pures supputations ou des potentialités non-réfutables ?

L'utilisation d'abaques, de lois physiques, de calculs prévisionnels limite, voire élimine, probablement les erreurs de l'ingénieur, mais sur les seules conséquences prises en compte par ce calcul, jamais sur l'impact d'un acte dans le champ écologique.

L'adoption de théories grandioses qu'elles fussent évolutionnistes (p. 177) ou systémiques (p. 156) peut stimuler l'imaginaire... mais elles se doivent concrètement d'être réduites à l'opérationnel, c'est-à-dire au contrôlable, sous peine d'un travail assuré en pure perte et finalement d'un discrédit de l'écologie.

Ceci n'exclut pas l'autocritique et les prises de conscience mutuelles même si le fondamentaliste a besoin pour être opérationnel de croire suffisamment à ses concepts et le technicien à son utilité socio-économique.

Mais selon la propension aux certitudes (créées par autosatisfaction ou/et par la réitération de dogmes collégiaux) ou au doute (conscience critique) les remises en cause seront plus ou moins difficiles et les conflits inter-individus ou inter-groupes plus patents.

Ce constat n'est pas anodin car les relations conflictuelles, tant intellectuelles qu'opérationnelles, n'ont pas d'autres origines.

Que faire ?

Nous n'avons pas le choix, il est indispensable d'adopter simultanément une attitude

a) assez cohérente au niveau du spécialiste, que nous sommes tous, pour travailler au mieux,

b) assez modeste pour 1) accepter de mettre à la disposition de tous les acquis et surtout les DICs et pour 2) autant que faire ce peut, dépasser les moyens dérisoires du spécialiste et accroître notre connaissance mutuelle.

On reconnaîtra demain l'écologue (fondamentaliste ou/et d'application) à cette aptitude à inscrire ses acquis individuels (et non ses seules hypothèses) dans la globalyse du champ écologique de l'écosphère quelle que soit l'importance de l'apport en DICs, de toute façon extraordinairement minime, qu'il pourra faire. Cela ne le privera en rien des interprétations, par essence provisoires et imparfaites qu'il fera, notamment en les traduisant comme contributions à une Base de Connaissances ouverte aux autres, mais cela lui permettra de respecter une règle somme toute banale, dans son principe, en sciences et techniques : publier les résultats en permettant la critique.

Les moyens aujourd'hui disponibles, et demain encore plus puissants, permettent parfaitement aux écologues, ayant une démarche rigoureuse par rapport à leur discipline, de satisfaire ainsi à la fois leur cohérence opérationnelle personnelle et leur contribution effective à une compréhension réelle du complexe où leurs travaux s'inscrivent.

C'est à ce prix que technicien et scientifique contribueront - au prix parfois de transgresser apparemment les orthodoxies sclérosées des disciplines institutionnalisées - à accroître la crédibilité de l'écologie par ajouts à notre connaissance de l'écosphère manipulée par l'homme. Leur "indiscipline" (LEGAY, 1986) initiale optimisera en fait leur propre domaine en le faisant contribuer à la connaissance générale sur notre environnement. Nul n'est besoin, comme cela pouvait être conçu (VAN Dyne, 1973), d'une intégration *a priori* des recherches écologiques en programmes lourds ; ce qui est nécessaire, c'est une attitude nouvelle, diffuse et généralisée de chaque écologue qui, à chaque approche, contribuera à la crédibilité de la discipline et rétroactivement à celle de leurs travaux. Cette crédibilité essentielle (p. 51, 522) ne sera pas acquise en différant les études écologiques ou en les détournant sur des études de potentialités hors du réel.

Car faut-il vraiment un paradigme, un fondement théorique, à l'écologie ?

Admettons : il découle immédiatement de sa définition : tout objet écologique vivant ou non est inclus dans un système et est lui-même un système, et tous ces systèmes évoluent à partir de leur état antérieur et sous l'influence des cinèses externes (mésonéats et actes). Cela nous renvoie au paragraphe 1.7.9. **< <L'écosphère est un système biophysicochimique régulé thermodynamiquement,... Fondamentalement, l'abstraction théorique s'écrit en une ligne, le problème est opérationnel > >.**

Toutes les théories de l'évolution, les paradigmes, les stratégies, les théories des systèmes, les spéculations sur la genèse de la vie... s'inscrivent nécessairement, si elles relèvent de la Science, dans ce domaine trivial... mais qui laisse au scientifique un vaste champ pour l'exploration des connaissances et au technicien la valorisation intelligente. L'écologie ne peut être fondée que sur son objet d'étude, qui nullement inaccessible, est proximal de l'homme. La démarche théorique de l'écologue ne peut être que la validation des modèles qu'il se crée *versus* cette réalité proximale. Ce n'est que par les deux Processus Répétitifs d'Accroissement des Connaissances et leur usage en synergie que notre connaissance, donc la qualité de notre action sur notre entour, deviendra pas à pas plus sûre.

7.4.2. Le contexte informatique

Au cours de cet ouvrage le contexte informatique des réalisations écologiques a été constamment évoqué. L'écologue n'a pas à être informaticien mais, par la nature des études écologiques, il doit utiliser à toutes les étapes de son travail les outils informatiques. Ceux-ci sont de deux types : les logiciels et les matériels.

Dès à présent l'acquisition des données peut aisément être accompagnée d'outils informatiques de saisie de données. Des micro-ordinateurs même très modestes, accompagnés de logiciels spécifiques à chaque spécialité, suffisent pour optimiser la saisie selon trois aspects :

- l'élimination d'erreurs,
- l'enchaînement de menus obligeant à décrire au niveau des fichiers les informations liées aux données - notamment celles du référentiel des données (p. 296),
- l'optimisation des saisies (adoption, même transitoirement de codes limitant le nombre de caractères utilisés pour supporter une donnée, connexion télématique entre appareils d'analyses automatiques et fichiers, utilisation de logiciels pour constitution de fichiers et gestion de fichiers, ...).

La gestion des Données Initiales Contrôlées doit se faire de façon écologique, c'est-à-dire "trans-disciplinaire", trans-écologues, trans-équipes, trans-nationale, ... Ceci n'est possible qu'avec des moyens informatiques lourds, par machines appartenant à de très gros systèmes et par les logiciels des SGBDR ayant toutes les fonctionnalités facilitant les diverses opérations de chargement, de normalisation, d'optimisation, de sécurité pour travail partagé multi-postes, d'interfaçage et de facilités télé-informatiques. De tels systèmes devraient, en suivant une évolution informatique constante, devenir de plus en plus conviviaux et accessibles sur, ou via, des ordinateurs de taille plus modeste.

L'interprétation fait appel aux choix de tablation (p. 356) ne nécessitant que des moyens limités. Les traitements mathématiques sont par contre très variés en fonction des objectifs. Aujourd'hui, nous disposons de nombreux logiciels spécifiques permettant des interprétations en un nombre croissant de modalités. Le problème pour l'écologue est de connaître les aptitudes de ces modalités vis-à-vis de ses objectifs. Nous en avons donné un aperçu sommaire aux paragraphes 6.4., 6.5. et 6.6.. Aujourd'hui de telles modalités sont souvent présentées en progiciels avec des guides incluant des menus (donnant les disponibilités) et de plus en plus de conseils guidant l'utilisateur (Progiciel : ensemble cohérent de programmes, de services... et qu'un usager peut utiliser de façon autonome. MORVAN, 1986).

L'Intelligence Artificielle est encore peu pratiquée de façon explicite ; elle participe de façon succincte à l'explicitation de menus, aux commentaires d'aide mais n'intervient pas encore avec tous les outils de l'I.A. nécessaires à l'écologie. Dans les Bases de Données Relationnelles, elle est opérationnelle. Pour l'écologue le devoir de lier les données au réel est implicite et deviendra nécessairement incontournable, puisque possible.

Ces BDR sont interfaçables avec de bons logiciels de Systèmes-Experts à des Bases de Connaissances ... ici encore présentement implantés sur grosses machines. La pratique actuelle est également de limiter à un objet précis l'expertise d'un domaine. Cette pratique se superpose de fait à la modélisation qui peu à peu permet la synthèse par connexité croissante de sous-ensembles dans le Processus Répétitif d'Accroissement des Connaissances systémiques.

Le fait de disposer d'un langage opérationnel restreint (cf. lexique, p. 564) facilitera grandement ces interconnexions explicitant expertises et modèles.

Nous venons de voir un bilan à partir des opérations effectivement conduites présentement par des écologues exploitant de façon opportuniste les moyens informatiques.

La réciproque existe. Par exemple des informaticiens préparent des progiciels pour optimiser les recherches d'environiciens. Cette préoccupation se traduit par la démarche visant à développer un complexe informatique interactif pour les scientifiques afin d'accroître la productivité d'équipes (3 à 5 individus). Ce complexe est conçu à la New Mexico State University (NMSU) (CONLEY *et al.*, 1986) sous le nom imagé d'"éta bli", pour fournir dans celui-ci, tous les outils susceptibles d'améliorer les activités des chercheurs en environnement.

Ce projet technique part de l'étude des besoins des chercheurs et constate que le responsable d'équipe consacre environ 10 % de son temps à la collecte des données (originales ou réutilisées), 20 % à leur interprétation ("analysis"), 30 à 40 % à la rédaction de textes et 30 à 40 % à la gestion du projet. C'est ce contexte que l'éta bli vise à optimiser, par économie sur la gestion des projets, pour accroître sensiblement les temps d'analyse et de rédaction.

Un tel éta bli comportera en conséquence essentiellement 4 progiciels : une Base de Connaissances, un module de statistiques et présentation des résultats, un module d'édition et un progiciel adapté à la gestion. Il s'agit fondamentalement de rendre interactif et disponible une gamme élevée de moyens pour ces quatre objectifs à l'aide de logiciels regroupés en progiciels. Il s'agit aussi de concevoir et de préparer un domaine orienté-objet permettant l'interconnexion de chaque fraction du complexe avec tout autre, par des interfaces très élaborées sur Systèmes-Experts.

Il est remarquable que ce projet insiste sur l'importance de la gestion non pas de données, non plus d'individus mais du travail d'équipe, et sur le fait qu'entre l'acquisition des données et leur traitement il y a un long délai où différentes personnes interviennent. Ce délai est d'ailleurs explicite dans le programme "Long Term Ecological Research" de la National Science Foundation.

Ce projet d'éta bli, partant non pas du point de vue d'écologue, mais d'une optique d'informaticien manque d'une logique écologique et de ce fait envisage les problèmes de langage écologique par approximations successives à partir des jargons des différents participants. Il ne place pas ses participants devant la logique des acquisitions-gestions-interprétations-intégration développées à partir de la nature même de l'information écologique.

A l'opposé c'est à partir des contraintes pragmatiques du chercheur que le projet vise à fournir toutes les aides en un éta bli, y compris les facilités des BDR, SE, BdC, traitements statistiques et des différentes modalités de représentation... et en outre les étapes de relations sociales (rédaction-publication, gestion financière).

7.4.3. L'écologie opérationnel

La fonction première de l'écologue est d'avoir une connaissance sur une partie de l'écosphère.

- Concrètement celle-ci est fondée sur des données ayant trait à des objets de cette écosphère.

- Opérationnellement, il ne peut appréhender qu'une partie très restreinte de celles-ci.

- Cette partie restreinte, perçue par un écologue, ne peut être interprétée isolément car elle est partie d'un tout et se subdivise en éléments ayant leurs propriétés sous-jacentes.

En conséquence, l'écologue-individu ne peut fournir que des données limitées en niveau(x) de perception, en espace-temps et en composition restreinte à son domaine de compétence ; il ne peut les interpréter sérieusement en ignorant les données objectives qui entourent sa perception ou la sous-tendent.

En conséquence, un écologue doit disposer des données objectives (DICs) acquises sur l'écosphère nécessaires à ses interprétations, et réciproquement doit fournir ses données pour d'autres interprétations.

Heureusement la donnée est indépendante des objectifs initiaux d'acquisition de l'écologue-individu et se prête à des réinterprétations *ad libitum*.

Prenons un exemple concret (et familier à l'auteur). Le poids d'un adulte de *Nicodrilus long us longus* capturé dans une prise traitée par lavage-tamassage ; la prise, de cotes connues, était située dans une prairie permanente pâturée localisée à une position géodésique précisée. Ce poids, normalement lié par ses référendaires, est situable par le référentiel des données (p. 296) et géré dans ECORDRE (p. 321), Base de Données Relationnelles conservant et obligeant à expliciter tous les liens de cette donnée aux autres auxquelles elle est liée.

L'objectif initial d'acquisition a été : constituer des ensembles de données permettant de comparer la technique "lavage-tamassage" avec la méthode "formol".

Mais cette donnée peut être réutilisée pour constituer des ensembles permettant entre autres

- d'estimer la biomasse de l'ensemble des Lumbricidae de la prairie ;
- de comparer les biomasses entre prairie et forêt,
- de comparer les modes de traitement pâture/fauche,
- de comparer la distribution des variations pondérales des adultes de l'espèce,
- de cartographier la distribution de l'espèce dans une des nombreuses cartes possibles incluant le lieu d'étude,
- d'étudier les voies migratoires de l'espèce reflétées par l'aire de celle-ci,
- d'estimer la disponibilité en acides aminés (dans le paysage de ce lieu, pour l'un quelconque des prédateurs de ce paysage),
- d'estimer le stock azoté de diverses biomasses des prairies pâturées,
- etc, etc., il est douteux que cette liste soit limitée.

L'écologue, c'est-à-dire toute personne interprétant une portion de l'écosphère (agronome, environniste, fondamentaliste, ...) est donc condamné à situer ses données dans l'état des connaissances objectives et à les interpréter "au mieux" de son point de vue, pour son objectif limité et transitoire et, pour cela, à utiliser les connaissances et interprétations déjà disponibles (en Base de Connaissances tenue à jour). En aucun cas, il ne peut se passer de l'outil informatique et sa contribution ne peut être qu'un grain de connaissance dans un ensemble intégrable à toute échelle de l'espace-temps. Si en 1989 les progiciels informatiques nécessaires ne sont pas encore définitivement développés cela ne tardera guère. En tout état de cause les écologues sont loin d'utiliser ceux déjà disponibles et constituant pourtant des outils-étapes essentiels.

Ces développements de logiciels ne sont pas du ressort de l'écologue *stricto sensu* mais de celui des informaticiens qui répondent se faisant à beaucoup de demandes analogues de gestionnaires de sociétés industrielles et commerciales ou de chercheurs d'autres disciplines disposant de moyens puissants.

Les données acquises dépendent aussi souvent de développements extra-écologiques (nature des actes : telle une nouvelle machine agricole) (accès analytique : telle la concentration en ^{13}C d'un organe, dépendant de développements d'appareils de mesure physique - ou l'identification correcte d'un taxon dépendant d'une étude taxonomique, ...). Le domaine central de l'écologue reste celui d'acquisition référée de données objectives sur les parties de systèmes écologiques qu'il appréhende et l'amélioration permanente des interprétations en écovalidant au maximum celles-ci par l'acquisition de données nouvelles adéquates.

Evidemment l'écologue peut avoir en outre une autre aptitude (biométricien, climatologue, alguologue, cynégéticien, ...) mais en tant qu'écologue sa responsabilité porte sur le progrès des connaissances objectives sur les systèmes écologiques en s'écartant de la situation, où il se trouve encore trop souvent, vis-à-vis de la position intellectuelle "théorique" ou de sa pratique "sociale", décrite ci-dessus (p. 460).

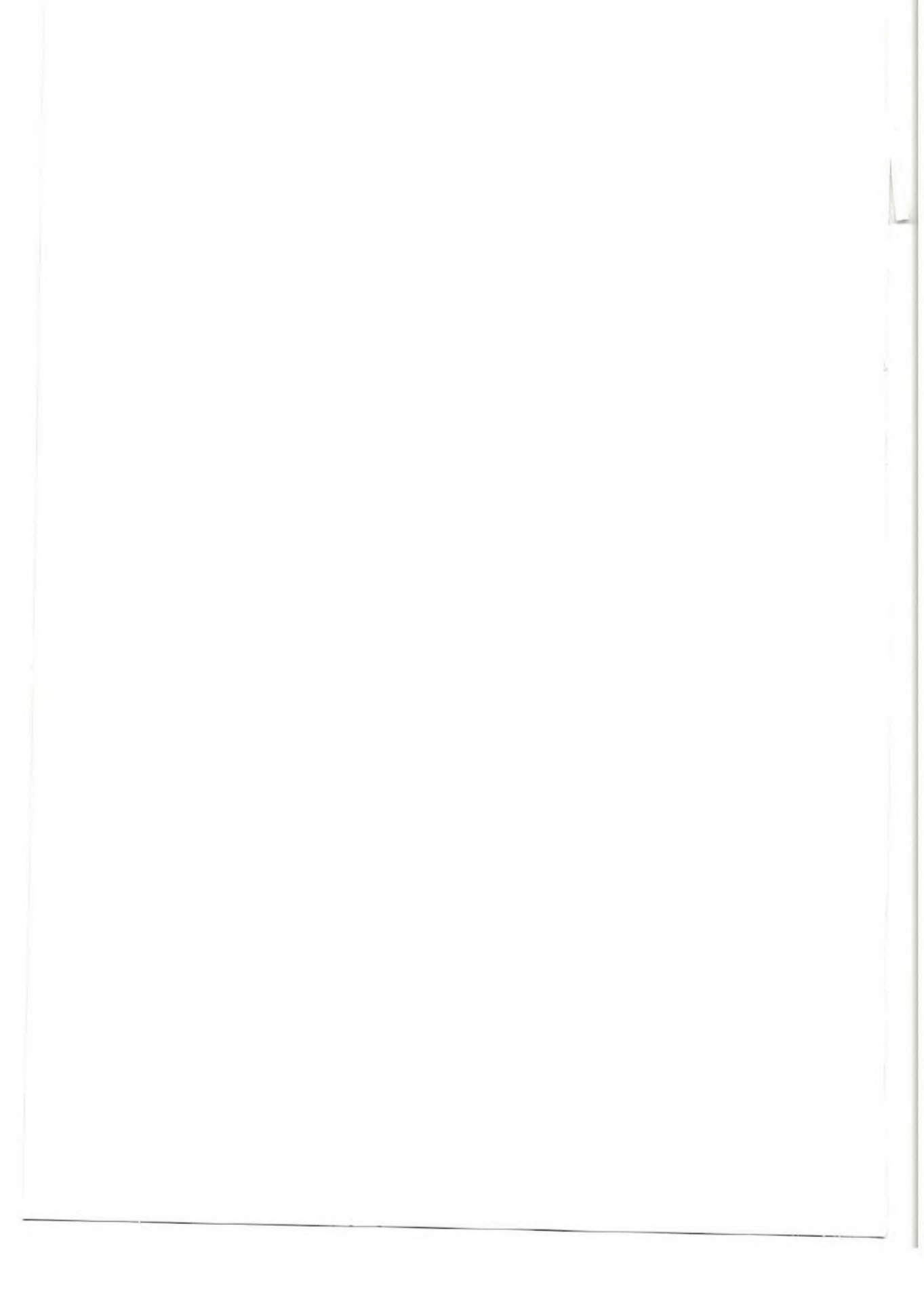
La mise en oeuvre des moyens modernes propres à réduire ses difficultés est possible et inéluctable. Reste à effectuer cette mise en oeuvre.

Cela dépend des écologues, devant accepter l'état de leur science pour ce qu'il est et devant adopter pleinement l'outil commun de leur discipline : l'informatique moderne (p. 341) en l'appliquant aux systèmes écologiques.

Cela dépend de la crédibilité sociale de l'écologie justifiant les moyens mis en oeuvre pour celle-ci.

Ces deux dépendances sont interactives : ne sera crédible qu'une écologie atteignant ses objectifs et ne seront efficaces que des écologues, au sens plein du terme, mis en situation de les atteindre.

La troisième partie de l'ouvrage esquisse quelques aspects (nullement exhaustifs) du rôle social de l'écologue.



TROISIEME PARTIE

DEVELOPPEMENTS

Le développement de l'écologie peut être souhaité par l'écologue qui apprécie intellectuellement cette discipline ou, plus prosaïquement, en vil. Ceci ne saurait être une justification des moyens qu'une société attribue à une discipline à travers les systèmes éducatifs, la recherche, le développement technique et enfin la diffusion de l'information.

A côté de l'attrait intellectuel, voire esthétique pour l'harmonie de la Nature, les moyens importants nécessaires à l'élaboration d'une écologie moderne ne pourront être, à l'instar des autres disciplines, qu'approximativement proportionnels à l'importance des utilisations (ou perspectives d'usages) que l'homme tire(ra) du corpus scientifique que l'écologie constitue(ra).

L'objet de l'écologie : l'écosphère, étant le milieu immédiat de l'homme, est *per se* d'une importance socio-économique littéralement essentielle. Or cette science est, au sens strict, quasi inexistante pour des raisons tenant à l'histoire des techniques que nous avons détaillée en deuxième partie et que nous savons dorénavant révolue. Aujourd'hui, une écologie pleinement opérationnelle est possible.

Le développement de l'écologie dépend donc de son efficacité sociale et réciproquement ce développement dépend du crédit moral et financier que lui accorde la société.

Toutefois, l'apport de l'écologie pleinement opérationnelle à l'usage rationnel de notre espace sera beaucoup plus important que sa fonction actuelle limitée aux constats des effets de nos actes.

En passant du constat à l'explication des mécanismes effectivement compris dans les systèmes écologiques on ouvre la porte au passage de l'explication à la proposition : l'écologie peut être non seulement source de progrès en minimisant les effets de techniques proposées hors écologie mais elle est, et surtout sera, source de propositions de techniques perçues et conçues depuis la connaissance de ces systèmes (p. 500) et de la pratique d'intégration des connaissances de cette science (p. 515).

L'écologue ne devrait plus avoir la fonction exclusive d'effectuer des constats a posteriori sur les erreurs humaines mais, usant de sa connaissance des systèmes écologiques, il devrait proposer des innovations tendant à un usage optimal de notre milieu.

Cela implique une dessectorialisation des approches socio-économiques encore rarissimes et une efficience effective de l'écologie.

11 faut donc observer lucidement les applications effectives de cette science et surtout son applicabilité (chapitre VIII) avant de conclure sur l'état d'une écologie authentiquement scientifique et opérationnelle (chapitre IX).

CHAPITRE HUITIEME

APPLICATIONS ET APPLICABILITE

8.1. Position de l'écologie appliquée

L'écologie peut-elle être applicable ? appliquée ?

Spontanément la réponse est positive tant la demande sociale en ce domaine est énorme... et s'est même traduite par l'écologisme (mouvement philosophico-politique appelé souvent très antinomiquement "écologie politique" ! p. 21). Elle s'impose comme discipline centrale si l'on veut maîtriser les changements globaux planétaires induits par l'homme et permettre un développement durable des moyens de vie de l'humanité. La réponse reste positive si l'on songe aux recherches ayant trait à l'environnement, à la prise en compte, au moins débutante, de paramètres "écologiques" dans les élaborations techniques agronomiques, industrielles ou d'aménagement.

En y regardant toutefois de plus près, cette réponse est beaucoup plus nuancée et tend même au négatif. Ce n'est pas l'addition de réponses ponctuelles à des préoccupations environnementales, mettant en oeuvre au coup par coup des techniques généralement physiques, chimiques ou biologiques, qui peut être regardée comme une application de l'écologie science globale des relations des organismes (dont l'homme) avec leur environnement.

Il suffit d'aborder une question quelconque, telle les causes de la désertification ou de l'érosion, ou comment optimiser l'application d'un produit chimique en toute connaissance sur un système écologique évalué sans réductionnisme, pour toucher du doigt l'impossibilité matérielle d'apporter une réponse fondée. Il y a à cela une cause simple : l'écologie n'était pas prête lorsque les erreurs techniques, à la fois cumulatives et de gravité croissante, ont déclenché une réaction sociale (écologisme) entraînant une prise en compte de quelques aspects de notre environnement et l'ébauche d'une nouvelle technologie : l'environique.

Cela rend particulièrement délicat l'exposé des utilisations de l'écologie.

1) En raison de la charge émotionnelle qui s'attache, dans l'esprit de beaucoup, et pas seulement du grand public, à l'usage impropre du mot écologie nullement perçu comme une science mais comme une sorte de philosophie, ou encore une agitation sociale, voire un amalgame de recettes techniques et juridiques. Mais l'écologie n'est qu'une science, c'est-à-dire n'est ni technique, ni droit, ni politique ou philosophie sociale, mais démarche critique visant à la connaissance du réel et, dans le cas de cette science, du réel proximal entourant immédiatement l'homme.

2) En raison de l'émergence, à peine amorcée, d'une écologie opérationnelle ; il est très difficile de parler d'applications d'un domaine à l'état d'ébauche.

3) En raison du "biocentrisme" qui marque de nombreux "développements de l'écologie" ; très souvent les applications écologiques, encore très ponctuelles, sont étroitement liées aux seuls acquis de la biologie (p. 201).

4) En raison des limites des physiciens et des chimistes, qui tout aussi partiellement que les biologistes, tendent à intégrer l'écologie pour des applications agronomiques, industrielles ou environnementales à partir d'une attitude sectorielle.

5) En raison du fait que l'écologie - comme toute science exacte - interfère dans ses applications avec les sciences humaines (économie, sociologie, politique, ...) et ne constitue qu'une contribution dans un ensemble échappant, pour une large part, à la compétence de l'écologue.

Il faut donc prendre avec modestie le chapitre traitant des applications de l'écologie... et pourtant !

Et pourtant, il est impossible de ne pas aborder ce sujet car :

1) L'écologie apporte une perception et une connaissance essentielles à l'échelle de l'homme : si son domaine intègre de très nombreux niveaux d'observation (p. 35) ceux-ci sont centrés sur notre milieu, à notre échelle, c'est l'approche globale et intégrée (inter-relationnelle) de nos actes et aléas ; c'est la science incluant les effets et limites de nos techniques particulières ou les conséquences de nos limitations usuelles. N'ayant pas disposé des outils nécessaires et des concepts opérationnels adéquats (c/. 2ème Partie), l'écologue fut défaillant, mais il peut et doit aujourd'hui remplir son rôle.

2) L'écologie opérationnelle apporte un outil d'intégration qui complète ceux qui se mettent en place au niveau plus particulier de la gestion de chaque entreprise humaine (agricole, industrielle, commerciale, ...) ou au niveau plus général de la gestion de nos sociétés.

Pour importante que soit l'écologie, elle n'est qu'une science limitée :

- comme toute science exacte, les fondements qu'elle procure nécessitent des recherches appliquées dont la validité anthropocentrique dépend du contrôle social et économique : elle ne peut se substituer aux décideurs que cependant, elle éclaire ;

- elle n'a pas pour objet d'apporter des réponses à des problèmes spécifiques qui relèvent d'autres disciplines. Si elle peut aider à développer des méthodes pour suivre des éléments chimiques radioactifs ou non, elle n'est pas adéquate, par exemple, pour les études de biologie génétique ayant trait aux effets directs et indirects de substances mutagènes non encore libérées dans la nature (étude de risques potentiels, p. 480). Autre exemple, elle ne contribue pas à la mise au point d'un épurateur de fumée limitant la fumigation de métaux lourds ou encore à la sécurité en génie chimique ou nucléaire. Tout au plus, peut-elle jouer un rôle dans les simulations des catastrophes écologiques liées à des défauts de sécurité potentiels... mais est-ce encore utile de simuler après les catastrophes en vraie grandeur (Ramade, 1987) ?

Enfin, nous n'abordons ici que les réponses - non culturelles - qu'apporterait l'écologie. Incontestablement, l'énorme diversité et quantité d'actions humaines entraîne de multiples difficultés dont nombre aurait pu être évité si les décideurs (les acteurs) avaient reçu une culture écologique. Faire une telle remarque, dans l'objectif positif d'attirer l'attention, est évidemment indispensable mais cet aspect didactique ne sera que peu abordé ici (p. 522) ; je renverrai simplement au travail monumental de EHRlich *et al.* (1977) ou à l'oeuvre de RAMADÉ (1982, 1987). Il s'agit ici de montrer de façon exhaustive • les applications d'une écologie au sens exact, en excluant les applications de la biologie hors contexte écologique, mais en incluant, à titre d'exemples, les problèmes d'environnement pris dans leur ensemble.

L'écologie, science du complexe, a été longtemps bloquée par notre incapacité à maîtriser des masses importantes d'informations et de connaissances disparates. L'écologie, science biophysicochimique, n'a pu longtemps s'affirmer en tant que discipline unitaire (monodisciplinaire) en raison du morcellement conceptuel et technique des disciplines qui y concourent et des limitations d'acquisition de données pertinentes en quantité et qualité.

Aujourd'hui, les progrès très spectaculaires de l'informatique rendent possible l'écologie et responsabilisent les écologues.

Depuis la définition de l'écologie, une longue gestation séculaire (1866-1966) a été marquée par l'accumulation de blocages conceptuels (notamment primauté de l'analytique sur le global, synthèses purement spéculatives, théories restrictives, études séquentielles par dossiers) et techniques (primauté des statistiques paucidescriptives stochastiques sur les études descriptives multidimensionnelles, approches morcelées longtemps synonymes d'efficaces malgré ses carences, etc.).

Si pratiquement ces blocages viennent d'être levés, l'écologie et singulièrement le praticien de l'écologie appliquée reste à créer à partir de la pensée de E. HAECKEL, débarrassée de ces blocages intellectuels et techniques qui ont marqué cette gestation.

C'est en effet à partir des années soixante que les efforts ont convergé pour alimenter une élaboration conceptuelle et opérationnelle de l'écologie. Initialement dispersés, ces efforts ont été catalysés par des programmes nationaux et internationaux, car la demande sociale est allée croissante parallèlement aux problèmes résultant de la mise en oeuvre de moyens physiques et chimiques de plus en plus puissants dans les domaines industriel, agricole ou d'aménagement du territoire. Plus la puissance humaine agissant sur l'écosphère allait croissante, plus corrélativement les erreurs techniques étaient lourdes de conséquences et plus la responsabilité de ces actes sur les systèmes écologiques, à court, moyen et long termes augmentait.

Dans ces conditions une prise de conscience sociale, suivie d'une demande des décideurs, ont poussé à des études intégrées relatives aux conséquences de nos actes sur les systèmes écologiques.

De telles études existent dans de très nombreux domaines allant de l'élimination moins irrationnelle des effluents industriels à la lutte biologique contre les nuisibles des cultures, en passant par une meilleure optimisation d'un élevage ou à l'étude d'impact d'un aménagement ou d'un pesticide.

Mais ces applications sont caractérisées par une contribution restreinte d'une ou deux disciplines (physiologie, démographie, chimie organique, pédologie, épidémiologie médicale) sur un problème lui-même restreint à un objectif délimité. Pour être opérationnel, on a été contraint de réduire le sujet d'étude et l'on a utilisé les outils paucidescriptifs traditionnels. Par exemple, en lutte biologique, on essaiera de mettre en oeuvre un parasite précis contre un nuisible défini alors que l'intégration économique du rôle d'un prédateur (nécessairement polyphage, p. 224) sur l'état sanitaire global d'un agrosystème reste problématique alors que son importance économique est probablement largement comparable.

Pour corriger les carences d'intégration, deux techniques se pratiquent nécessairement

1) soit l'accumulation d'essais paucifactoriels pour tendre à couvrir par accumulations d'opérations sectorielles successives les processus supposés en cause, ainsi en est-il par exemple de l'accumulation des tests en toxicologie... qui ne garantissent cependant pas les conséquences en agroécosystèmes (p. 480) ;

2) soit l'on réunit des commissions d'experts qui confondant et additionnant leur points de vue particuliers tentent d'opiner au mieux, par exemple sur la gestion d'un parc naturel, sans pour autant que rien ne garantisse, ni une critique scientifique des arguments, ni une couverture du domaine de compétence souhaitable.

Ces approches parcellisées et paucidescriptives cumulées, seules possibles jusqu'à récemment, répondent-elles à une utilisation optimale de l'écologie? Tire-t-on profit des études globales des systèmes biophysicochimiques complexes qui caractérisent l'écosphère dans laquelle nous intervenons ?

Jusqu'à présent la réponse est évidemment négative, en raison de l'indisponibilité de telles études et des limitations des recherches ponctuelles. Caractéristiquement, j'ai entendu deux interventions récentes illustrant de façon schématique cette situation.

Le Professeur De ZEEUW dans l'introduction inaugurale du 4ème Colloque Européen d'Ecologie, traitant des limites de l'agriculture, devait souligner <<a nccd for applicable ecological dala>>, non pas un discours sur une théorie de l'écosystème mais que les écologues <<should also provide alternatives for management practices partly based on sound ecological principals>> De Zeeuw (1988).

A l'inverse, au cours d'une conférence plénière du XIII Congrès International des Sciences du sol (Hambourg, 1986), le Professeur Dudal, après 29 ans d'exercice en tant que pédologue à la FAO, s'interroge de façon critique sur l'utilité effective des cartes pédologiques, ou plutôt de leur adaptation à la demande sociale (DUDAL, 1987).

D'un côté, une demande pour une contribution effective avec des propositions écologiques applicables, de l'autre la production, par une discipline concourant à l'écologie, de documents peu adéquats à leur usage effectif.

C'est l'indisponibilité d'une écologie opérationnelle mobilisable sur des objectifs concrets qui constitue la carence majeure actuelle de nos interventions techniques.

Par une véritable démonstration par l'absurde, on peut dire que les solutions particulières, localisées peuvent toujours être trouvées pour des estimations de conséquences à court terme. Les difficultés s'accumulent par contre dès que le système est "multidisciplinaire" c'est-à-dire biophysicochimique et non simplifié par un procédé artificiellement contrôlé dont on néglige les effluents (processus industriel, cultures hydroponiques, élevages hors sol).

Il y a en fait une forte demande pour la mise en oeuvre appliquée de l'écologie pour résoudre des problèmes d'une extrême gravité et d'une grande diversité, de la conservation des sols (le globe terrestre perd en terres cultivables annuellement 6 à 7 millions d'ha, 2 fois la Belgique !) aux mouvements d'éléments nutritifs, toxiques ou cancérogènes, en passant par la dégradation potentielle des milieux soumis à des influences humaines variées et par le besoin d'accroître la production nutritionnelle en régions défavorisées, ou encore par la réduction inquiétante de l'ozone nous protégeant des radiations.

Tous ces processus s'inscrivent dans le champ écologique à des échelles variées de l'écosphère, c'est-à-dire relèvent de l'approche globale avec les méthodes analytico-synthétiques d'étude des systèmes écologiques, décrits dans la deuxième partie et sur la base de connaissances fondamentales présentées en première partie.

Le problème n'est pas dans la demande sociale : elle existe et prend des aspects politiques parfois particularisés (= écologisme) - le problème est dans l'inefficacité de l'écologie, en tant que science et en tant qu'applications. En tant que science nous avons vu sa toute récente faisabilité (reste toutefois à la "faire") ; en tant qu'applications, évoquons-la.

8.2. Modalités d'application

Comme toute science exacte, l'écologie s'applique en fonction de problématiques s'inscrivant dans le contexte socio-économique. Elle ne saurait être confondue avec ce contexte, p. 27) mais quelle(s) fonction(s) doit-elle remplir vis-à-vis de celui-ci ?

Cette question, en situant l'écologie socio-économiquement, à la fois limite et structure les responsabilités ; faute d'y répondre, il est loisible pour l'écologue de rejeter sur la société les conséquences des carences de sa discipline et il est commode pour les acteurs socio-économiques de tourner le dos à leurs obligations.

La diversité des problèmes environnementaux, l'anarchie interne d'une écologie aussi mal définie que mal perçue, voire mal pratiquée faute d'outils et de moyens adéquats, ont engendré une confusion telle que l'on peut à la fois évoquer l'écologie dans des domaines qui lui sont totalement étrangers et omettre sa mise en oeuvre là où elle est indispensable.

Pour l'écologue, la première difficulté est d'ordre positionnel vis-à-vis des multiples activités sociales, politiques, juridiques, scientifiques, techniques, etc. Quelle est la place de l'écologue dans les activités humaines ?

La deuxième difficulté est d'ordre opérationnel. Où, quand et comment l'écologue peut-il intervenir ?

La réponse à ces deux questions essentielles est quasi simultanée et découle directement de la définition de l'écologie (p. 20) et des notions générales développées au chapitre I.

A la deuxième question : Où et quand l'écologue doit-il intervenir ? Une réponse partielle s'impose : dans tout ou partie de son objet d'étude : l'écosphère.

Comment l'écologue peut-il intervenir ? Cette question nécessite plus de détails : évidemment grâce aux deux Processus Répétitifs d'Accroissement des Connaissances (2ème partie) sur les systèmes écologiques (chap. II).

Cette modalité d'intervention dépend des moyens passés (— acquis antérieurs), présents (opération immédiate) et futurs (recherches appliquées et fondamentales) que la société accorde, ce qui revient à répondre à la première question : quelle est la place de l'écologie dans les activités humaines ? Ceci découle très simplement des relations qu'a cette science avec les disciplines des sciences exactes (physiques, chimiques et biologiques) s'appliquant à l'écosphère et de la mathématique logique, intégrables par les techniques informatiques (fig. 1-13, p. 104).

Les relations avec le contexte socio-économique, également très claires, doivent être ici encore précisées car les confusions intellectuelles sont banales. Rappelons que l'homme agit sur les systèmes écologiques par des actes (p. 96) parfaitement descriptibles comme données écologiques (p. 272) : il s'agit de données objectives sur lesquelles l'écologue travaille.

Par ailleurs, la société peut exprimer auprès de l'écologue des demandes qualitatives, subjectives, parfois confuses et, réciproquement, l'expert écologue peut exprimer des demandes de moyens et de précisions. Cette relation, qui n'est pas spécifique à l'écologie, est également développée au paragraphe 1.7.8. (fig. 1-13).

Cette relation socio-économie/écologie peut être formalisée en écologie opérationnelle donc intégrée (chapitre VII) notamment par des relations d'expert, y compris à travers les Bases de Connaissances de l'Intelligence Artificielle (fig. 8-1) permettant une prise en compte de demandes précises et des données objectives.

Mais l'écologue ne saurait se substituer aux diverses autres activités intellectuelles ou techniques ayant pour conséquences de conduire aux actes. C'est le résultat des choix des décideurs qui agit directement ou indirectement sur les systèmes écologiques.

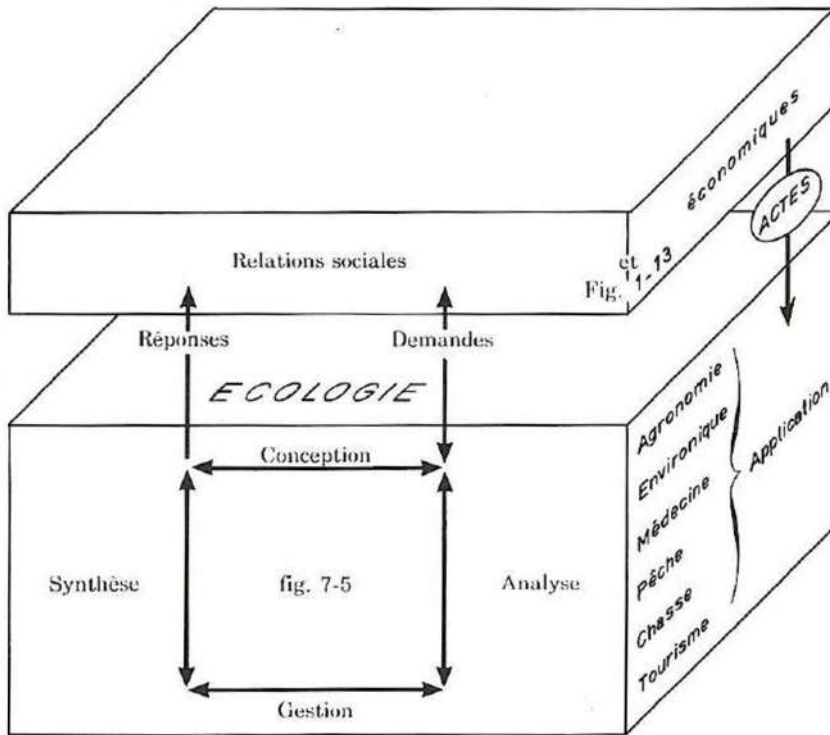


Figure 8-1 - Interfaces opérationnelles entre les relations socio-économiques et les applications de l'écologie (pour plus de détails voir fig. 7-5, p. 449 et fig. 1-13, p. 104).

Parmi ces décideurs le politicien orientera les grands choix, en tenant compte de divers avis économiques, sociaux, etc. ; il fixera les grands travaux et indiquera les cadres d'action ; le juriste précisera des cadres institutionnels et réglementaires ; les techniciens proposeront et mettront au point différents outils, appliquant les sciences exactes susceptibles d'être mises en œuvre. Enfin, des entreprises (fermes, industries, mines, travaux publics, ...) appliqueront ces techniques et accompliront les actes ayant des conséquences sur les systèmes écologiques.

L'écologue est aussi un citoyen qui peut, dans le cadre de ses relations sociales entre individus, opiner sur la conduite des affaires générales, mais, en tant que scientifique, il n'agit que par l'appréciation des conséquences des actes sur les systèmes écologiques ou encore, connaissant ces systèmes, propose des solutions (actes) selon des modalités plus cohérentes avec ceux-ci.

Les conséquences des actes seront par ailleurs jugées selon des critères socio-économiques (où l'écologie intervient culturellement) ; ces jugements positifs ou/et négatifs pourront conduire à modifier les modalités de leur mise en œuvre.

En précisant ainsi la place de l'écologie, il est possible d'achever de répondre à la question : comment l'écologue peut-il intervenir ? En étudiant les conséquences des actes sur le fonctionnement des systèmes écologiques de l'écosphère, en en faisant connaître les résultats et en suggérant d'autres actes, notamment aux décideurs, techniciens et opérateurs à toute échelle de l'écosphère et quelle que soit la nature

des actes et des écosystèmes effectivement étudiés. Si souvent les questions lui sont posées en termes sociaux (par exemple, quelle est la qualité d'un milieu ?) il ne peut répondre qu'en termes circonstanciés (vis-à-vis de comparaisons sur caractéristiques et critères identifiés) sans jugement subjectif sur la "valeur" des différences observées : cette valeur relève de la perception sociale (p. 485).

Les techniques mises en oeuvre se traduisent par des actes employant des moyens physiques, chimiques et biologiques, ou une combinaison de ceux-ci. Ces actes agissent sur le système écologique au point d'application, puis de proche en proche, par leurs conséquences temporospatiales sur les systèmes adjacents locaux, régionaux et du globe. Ils ont enfin un aspect qualitatif - en modifiant la nature des systèmes écologiques eux-mêmes - et quantitatif par leur fréquence et leur intensité. L'appréciation des techniques d'action relève de l'utilisation rationnelle de l'écologie.

11 s'agit donc d'apprécier les conséquences de nos actes (ce qui serait d'autant plus facile que leur liste, si elle est importante, n'est toutefois pas infinie), d'évaluer leurs conséquences locales, régionales, globales et de dégager à partir de ces appréciations, des propositions d'actes nouveaux optimisés.

Ce constat, d'évidence naïve se heurte toutefois à trois difficultés :

1) La méconnaissance des systèmes écologiques sur lesquels nous agissons. Nous avons vu en deuxième partie qu'il ne s'agit plus maintenant pour l'essentiel que d'un problème quantitatif : pour faire passer l'écologie du stade qualitatif de pré-science (sans les outils adaptés à son objet, ce qui était son cas) et quantitatif (face aux besoins, les moyens qui y sont objectivement dévolus sont quasi virtuels, cf. par exemple HENRY, 1984). Devant l'urgence il est enfin d'usage d'étudier les milieux "à problèmes" et non pas l'état normal : on ne s'intéresse qu'aux symptômes en ignorant l'état sain (par exemple, au seul Sahel en cours de désertisation et non à sa situation antérieure, jugée "normale").

2) L'habitude de ne pas faire l'étude des conséquences de nos actes (hormis quelques caractéristiques directement liées à l'effet économique à court terme ou à l'évidence").

2a) Cette habitude est atavique car, pour l'acteur, l'acte a un objectif précis : on bâtit une maison pour s'abriter ; on emploie un pesticide contre un nuisible ; on coupe un arbre (ou construit une centrale nucléaire) pour se chauffer ; on rejette des ordures pour s'en débarrasser, etc.

On néglige ainsi habituellement tes conséquences induites, par exemple le pesticide tue bien le ravageur visé mais aussi d'autres organismes induisant des déséquilibres biophysicochimiques, il apporte du phosphore dans le système par le produit, ou a un effet carcinogène, ...

2b) On admet "à l'évidence" que l'augmentation de CO₂ atmosphérique est due à l'usage de combustibles fossiles et à la déforestation ; deux modifications évidentes, mais où sont les preuves qu'il s'agit bien des deux seuls mécanismes majeurs ?

3) L'ignorance de l'interface opérationnelle entre socio-économie et écologie (fig. 8-1). Si d'un point de vue intellectuel, donc culturel, il y a des échanges qui peuvent influencer à divers niveaux (politique globale, décisions d'entrepreneur, etc.) sur les actes et modifier les modalités d'étude des écologues (problématique, moyens, ...) en écologie opérationnelle seuls les actes comptent (p. 272) car ils doivent être pris en compte dans la globalyse du champ écologique pour une systémique opérationnelle.

Parmi les actes, il faut distinguer deux catégories :

- a) les actes décidés, tels la construction d'un barrage, l'apport d'un engrais, l'ouverture d'une mine, un reboisement, l'émission de fumées, la mise en décharge d'ordures, ... dont tous les effets (jugés positifs ou négatifs) sont intentionnels,
- b) les actes accidentels, résultant d'accidents - inévitables dans toute activité - dont les effets sont des risques aléatoires.

Il faut aussi distinguer :

- a) les systèmes écologiques aux caractéristiques biophysicochimiques pour l'essentiel spontanées sur lesquels le contrôle humain (en termes d'actes) est "externe" (= le fonctionnement est écologique),
- b) des systèmes confinés où l'homme contrôle par une intervention permanente les processus sous contrôle (transport de matériaux, réacteur nucléaire, construction d'automobiles, collecte et broyage d'ordures, élevage hors sol de porcs, brassage de bière, etc.). Ces systèmes confinés ont des interfaces écologiques (actes) par leurs intrants depuis les systèmes écologiques (telle l'extraction minière ou la récolte de houblon), leurs extrants (tels les déchets et les produits libérés hors contrôle permanent) et leurs actes accidentels, explosions, ruptures de barrages ou de canalisations, ...

Les actes décidés ou accidentels ont des conséquences multiformes très nombreuses qui, du fait même de la pullulation démographique humaine et de l'action croissante de chaque homme, modifient non seulement le lieu d'action, localement, mais aussi régionalement et globalement. L'impact de la population terrestre, s'accroissant toujours à un rythme rapide dans les pays en voie de développement, combiné avec l'accroissement de l'usage individuel de l'écosphère en pays développé, entraîne une augmentation permanente de l'impact de l'homme, de sorte que Ramade (1987) place ce processus, à juste titre, parmi les catastrophes écologiques de notre planète.

Les conséquences "imprévues" (mais nullement imprévisibles... et que l'on peut donc regarder comme volontaires) de nos actes sont diverses et finissent par agir sur l'homme. De sorte qu'il y a réaction sociale des victimes de ses actes et que c'est via la société que l'on est conduit à s'interroger sur les conséquences de nos actes. Le problème est ainsi abordé à l'envers par rapport au processus ; c'est-à-dire en partant des conséquences pour ensuite rechercher "à tâtons" l'origine souvent complexe de la nuisance.

Cette recherche sur l'origine des nuisances est relativement simple quand les conséquences sont perçues peu après l'acte sur un effecteur direct. Par exemple, les "pluies acides" qui affectent aujourd'hui presque toute notre planète résultent largement de l'émission d'aérosols et gaz industriels n'ayant subi qu'un transfert aérien (avec quelques modifications chimiques).

C'est beaucoup plus complexe quand on note l'eutrophisation d'un lac ou plus "simplement" l'excès de nitrate dans l'eau des nappes phréatiques ou encore la disparition de l'écran d'ozone qui protège la vie sur notre globe. Alors les mécanismes évoqués peuvent n'être qu'un aspect d'un processus complexe mal identifié.

Naïvement, il serait plus rationnel de connaître fondamentalement les systèmes écologiques objectivement (et non par le discours sur ces systèmes) dans lesquels nous vivons et d'apprécier les conséquences de nos actes sur ceux-ci pour en tirer les conséquences positives et négatives afin de décider de leur intérêt avant leur application (p. 477).

Naïvement toujours, toute activité humaine portant sur des systèmes contrôlés, comme décrits ci-dessus, pourrait être appréciée écologiquement (et corrélativement pour son coût social par ses intrants et tous ses extrants, y compris effluents rejetés "dans la nature").

Pratiquement, il y a une prise de conscience presque toujours négative, voire catastrophique (RAMADE, 1987), de nos actes qui déclenchent des études environnementales parcimonieuses d'autant plus inefficaces que les relations causes-effets passent par la connaissance des systèmes écologiques normaux, c'est-à-dire non "raccourcis" par réductionnisme et observés dans leur problématique exacte et non à partir de points de vue dominants.

Les quelques études de chaînes trophiques polluées ou de mécanismes de pluies acides évoqués ci-dessus ne sauraient faire illusion : la plupart des mécanismes, par carence de connaissances élémentaires, ne peut être ni décelé, ni perçu. Par exemple, malgré l'interdiction d'usage des Polychlorobiphényles (PCB) en Suisse en 1977, la contamination par ces organochlorés du Lac Léman ne cesse de croître, ce processus devant se poursuivre encore longtemps en raison de la latence des systèmes socio-économiques (techniques) et écologiques ayant incorporés ces toxiques (TARRADELLAS, 1986).

Les "applications de l'écologie" se situent généralement dans un contexte irrationnel ; elles ne partent pas des actes et de leurs conséquences sur les systèmes écologiques mais recherchent *a posteriori* les causes d'effets constatés sur des systèmes inconnus, faute d'études.

La demande sociale, tardive, diffuse, mal formulée, exige des solutions à un nombre croissant d'"inconvenients" (saleté, disparition d'espèces, d'ozone, de sols, intoxication aigüe... effets chroniques des cancérrogènes, peur du radioactif, du "chimique", ...).

Dans ce contexte non seulement les problèmes sont mal posés, formulés trop tard, après dispersion des toxiques par exemple, mais l'usage de l'écologie est perçu dans un contexte littéralement rétrograde.

Plutôt que de savoir ce que nous faisons sur les systèmes écologiques, c'est-à-dire sur notre propre milieu, et de ce fait de tirer partie de toutes conséquences positives de nos actes (nous ne considérons usuellement que l'une d'elles) nous ignorons à la fois les aspects intéressants et les ombres dont il faudrait se prémunir.

On comprend dès lors la perception confuse du public, et d'une bonne partie de l'intelligentsia, qui confondent écologisme, environique et écologie (p. 21).

Malgré ces indubitables difficultés, quelques exemples d'application ou de possibilité d'application de l'écologie vont être évoqués au paragraphe suivant depuis, ce qui devrait être l'usage rationnel de l'écologie, par l'étude *a priori* des conséquences des actes, jusqu'à l'approche irrationnelle traditionnelle motivée *a posteriori* par les effets pervers des techniques appliquées en aveugle décrite au paragraphe 8.4..

8.3. L'étude rationnelle *a priori*

8.3.1. Modalités

Logiquement toute technique physique, chimique ou biologique devrait, avant sa mise en oeuvre en tant qu'acte généralisé, faire l'objet d'une étude de ses conséquences sur les systèmes écologiques (et non en dehors de ceux-ci). En général, toute décision modifiant la mise en oeuvre de ces techniques devrait s'appuyer sur de telles études. L'innovation technologique - visant à modifier ces systèmes - devrait, dès sa conception, utiliser la connaissance de ceux-ci. Attention, il s'agit ici des systèmes réels et non de quelques variables de ceux-ci, choisies *a priori*.

Il est relativement facile de connaître la nature simple ou complexe de l'acte envisagé, souvent bien défini : introduction sur le marché d'une nouvelle molécule au domaine d'application précis, construction d'une autoroute ou d'un barrage, abandon d'une culture au profit d'un autre usage de l'espace, déboisement, chalutage, émission d'une fumée, mise en dépôt de matières radioactives, etc.

Si l'étude systémique était développée (chap. Vil), il serait possible de définir les conséquences prévisibles (modèles conceptuels) puis d'observer (expérimentation par action sur systèmes sélectionnés selon des modalités logiques : RV, p. 379) voire d'utiliser des connaissances antérieures gérées en Base de Connaissances (p. 428). Enfin exceptionnellement, en cas de carence de connaissances et de grands risques potentiels, d'effectuer l'étude des potentialités en microcosmes (p. 401).

En effet, les actes agissent sur les écosystèmes de façon intentionnelle. Par exemple, le lancement commercial d'un pesticide entraînera des conséquences mesurables et appréciables sur les lieux d'application du produit. Au cours de sa production, il impliquera l'utilisation de matière première (actes de récolte), le rejet d'effluents et déchets divers dont les conséquences peuvent être appréciées.

Enfin, des accidents se produiront, y compris la perte du contrôle de matières confinées qui ne devraient pas être mises en contact avec les systèmes écologiques. Leurs conséquences devraient être prises en compte *a priori* en tant que risque.

Les appréciations *a priori* de conséquences d'actes et de risques ne sauraient être faites dans une démarche abstraite mais bien dans une systémique où les autres actes, pré-existants ou simultanés, sont pris en compte. Un engrais ne saurait être apprécié hors les itinéraires techniques où il s'inscrit ; l'apport d'un élément chimique (N, Cd, P, ...) associé à une molécule peut s'ajouter à d'autres apports de cet élément, etc. L'écologie discriminante vraie, incluant les actes, incorpore nécessairement ces itinéraires aux effets cumulatifs, synergiques ou compensateurs.

Evidemment, cela implique une systémique, qui, prise isolément, au cas par cas, peut sembler d'un coût social prohibitif ; ce sentiment est sans aucune preuve économique, faute de systémique opérationnelle. On peut cependant, remarquer que

1) les études systémiques ne sont (seront) pas conduites au cas par cas mais de façon cumulative en s'appuyant sur les Bases de Données Relationnelles et Bases de Connaissances : plusieurs actes pourront être appréciés sur un même système écologique et réciproquement plusieurs systèmes seront confrontés à un même acte,

2) les études systémiques permettent de connaître les conséquences, y compris positives et inattendues des actes, et peuvent influencer positivement sur la valorisation de la technique d'action en cause ; elles doivent également réduire les utilisations aberrantes et conséquemment coûteuses,

3) la connaissance systémique permettrait d'élaborer des actes en connaissance de systèmes où ils agiront : il n'y aura pas qu'explication mais proposition.

Dans ce domaine, où les mises en oeuvre restent à faire à tout niveau, les "arguments économiques" ne peuvent avoir de fondements, faute de base de calcul.

8.3.2. Changement de perspective par l'écologie

En replaçant les problèmes constatés dans le contexte du Champ écologique, et non en partant des théories, dogmes ou acquis restreints des disciplines, on inverse la démarche conceptuelle : ce n'est plus à partir de ces points de vue particuliers que l'on raisonne mais du système globalement décrit, en commençant par les objets majeurs (généraux) observables directement dans le système concret (p. 441). Ceci nous l'illustrerons de deux exemples connexes. L'un lié à l'érosion, l'autre à l'évaluation des pesticides qui permettront de concrétiser la systémique finalisée avant d'en tirer l'intérêt pratique relativement au bilan des méconnaissances à réduire (p. 482). La prédictibilité de ces études et les valeurs liées aux jugements depuis celles-ci seront décrites respectivement aux paragraphes 8.3.3. et 8.3.4., avant l'interférence, associée au compromis pratique entre systémique scientifique et empirisme pragmatique (p. 488).

1. **Nécessité de l'approche globale : exemple des dégradations physiques des sols**

L'étendue des sols dont la structure physique est dégradée va croissante et les conséquences économiques de cet état (retard aux travaux printaniers, récoltes difficiles ou impossibles, accidents culturels, érosion) sont de plus en plus spectaculaires. Cette dégradation, qui n'a été longtemps préoccupante qu'en climat tropical, devient un souci majeur dans les grandes cultures des milieux tempérés.

L'observation de ces sols révèle effectivement une absence de structure grumeleuse, une faible stabilité des structures obtenues par les travaux aratoires (les particules se délitent sans liens physiques), un faible taux de carbone organique avec des accumulations de débris (telle la paille), une semelle de labour (couche profonde indurée par la réaction de la charrue lors du labour, ce qui a toujours existé), parfois un tassement particulier dû aux gros engins. L'infiltration de l'eau est limitée par (phénomène nouveau) l'étanchéité de la semelle de labour. Parfois elle ne se produit plus dès la surface qui, boueuse, obture toutes les voies d'écoulement (sol délité dit "battant"). L'eau ruisselle alors en surface, dès de modestes précipitations, et entraîne horizontalement une suspension argilo-limoneuse Huante : il y a érosion même avec une très faible pente.

C'est l'état du sol malade que révèle l'étude physicochimique classique avec des symptômes tel l'impact du labour et du tracteur, et le taux faible de carbone de ces sols (par rapport à ce que l'on a connu ou ce que l'on sait ailleurs...).

Mais pourquoi ces symptômes nouveaux en sols tempérés ? Depuis cette observation restreinte deux réponses s'imposent à partir des variables d'état :

1) le faible taux de matière organique (qui joue un rôle positif dans la stabilité structurale) est attribué à une réduction-suppression des "restitutions" par fumures organiques (fumiers, ...). "Evidence" liée au changement de nos pratiques agricoles ayant exclu les engrais organiques,

2) les travaux aratoires de puissance croissante détériorent la physique des sols (cette "évidence" est liée à l'augmentation de puissance des machines).

Dans les deux cas, ces interprétations classiques témoignent d'une référence au passé (fumures organiques, machines moins puissantes) et évoquent un mécanisme, un fonctionnement de système, des cinèses fonctionnelles effectives mais fondent ces interprétations sur un simple commentaire découlant des variables d'état en cause, sans étude effective des mécanismes. L'étude est en fait réduite à l'observation des symptômes ; l'interprétation, "évidente", est incontrôlée.

Pourtant l'étude d'un "témoin", d'un sol "sain" non érodé peut ne pas être bien éloigné dans l'espace ou le temps.

Observons la prairie permanente voisine : taux élevé de carbone, structure grumeleuse, réseau racinaire profond, infiltration souvent rapide de l'eau, couverture

végétale, faibles actes mécaniques. Pourquoi l'eau s'infiltre mieux dans un sol non travaillé, non brisé par le labour, fortement stabilisé ? L'observation directe de l'écoulement indique que celui-ci s'effectue dans des galeries de vers de terre en période humide lorsque les argiles sont regonflées (EHLERS, 1975, LOPES-ASSAI, 1987). AL ADDAN *et al.* (sous presse) montrent une corrélation entre la percolation dans le profil du sol et la biomasse de lombriciens anéciques vivant dans ce profil, fig. 8-4, p. 520).

Si une ancienne semelle de labour existe, elle est perforée de galeries profondes. La matière organique est abondante : malheureusement l'absence de bilan des émanations organiques par les cultures ou les prairies interdit de connaître les cinèses de renouvellement du carbone de la nécromasse. La matière organique est par contre intimement mêlée à la matière minérale dans des grumeaux stables qui sont des coprolithes lombriciens (observés par litière marquée, OIETZ et BOTTNER, 1981). Ce mélange organominéral est stabilisé par les polysaccharides microbiens (GIJCKERT, 1973) (p. 149). Les racines réunissent ces coprolithes par un réseau de fibres créant élasticité et cohésion entre grumeaux.

Revenons au malade (le champ érodé) : point (ou très peu) de galeries de lombriciens, une semelle non perforée, pas de grumeaux à mélange intime organo-humique, pas de lacis racinaires : le syndrome révèle de nombreux autres symptômes par cette approche modestement qualitative.

L'absence de connaissance intégrée interdit une interpolation des causes de libération du carbone : oxydation excessive due aux travaux mécaniques ou/et réduction des apports ou "restitutions" organiques de cultures pourtant plus productives que naguère ?

Absence de fertilisation organique ? Mais les quantités apportées jadis, issues des champs, étaient en moyenne annuelle faibles.

On peut constater la disparition des lombriciens, de leurs galeries et grumeaux... mais la cause peut être due aux traitements phytosanitaires ou/et à l'oxydation intempestive résultant des travaux aratoires ou/et à la réduction d'apports organiques ou/et à des apports organiques désynchronisés par rapport aux activités microbiologiques et microbiologiques des sols.

L'augmentation de puissance des tracteurs est-elle la cause de la dégradation ou la conséquence d'un travail plus difficile obligeant à la mise en oeuvre d'un travail physique croissant ? La dégradation ne résulte-t-elle pas des conditions de travail des machines en sols qui, ne pouvant plus se ressuyer et n'ayant plus de drainage interne, obligent aux travaux en mauvaises conditions ?

Ces questions peuvent parfois recevoir des réponses partielles, lorsque les spécialistes d'un de ces aspects existent et sont disponibles. Elles ne peuvent être intégrées dans un ensemble cohérent d'interprétations à partir de ces réponses particulières dont la validité ne peut être assurée par la seule affirmation spécialisée mais seulement par une démonstration intégrée des processus. Celle démonstration est généralement impossible car le système complet n'est pas descriptible par carence d'études intégrées relatives :

- a) aux productions de nécromasse, à leur dynamique, à leur répartition et liaisons en relations avec le système,
- b) aux racines et à leur rôle effectif étudié *in situ*,
- c) au rôle (notamment physique) quantifié de la faune étudiée *in situ*,
- d) et dans ce cas, aux contraintes de travail, dans la ferme,
- e) aux cycles biogènes, et notamment d'azote lixiviable abondant sous labour et très peu en semis direct (KANWAR *et al.*, 1985 ; ELLIOT et COLEMAN, 1988, TAUREAU et FONTAINE, 1987), le labour entraînant par ailleurs des carences momentanées d'azote par enfouissement prématuré de litières pauvres en cet élément !

L'intégration de quelques connaissances effectivement acquises est possible mais ne peut représenter le système morphofonctionnel que l'approche globale comparative a mis en évidence pour certaines de ses caractéristiques d'état. Des secteurs entiers de connaissances essentielles et accessibles n'existent apparemment

pus mais pourraient être développés et rendus accessibles en Bases de Connaissances ! En tous cas l'approche non sectorielle révèle des carences fondamentales échappant, par nature, à l'optique de spécialistes.

2. Perspectives d'évaluation systémique des risques : cas des pesticides

Un appel d'offre du Ministère de l'environnement dresse un constat d'évidence <<Les instances accordant les homologations dans le domaine phyto-sanitaires sont devenues, dans la plupart des pays, de plus en plus exigeantes... Tous ces éléments, fort intéressants et indispensables, n'apportent cependant pas de réponse satisfaisante quant à l'évolution des risques pour la flore et la faune sauvages, pour le devenir des équilibres naturels soumis de façon permanente à la pression des composés phytosanitaires>> ANONYME, 1987. On ne saurait mieux dire que très longtemps après la mise en oeuvre d'un très grand nombre de molécules complexes, elles-mêmes susceptibles d'une grande diversité de réactions chimiques en milieux complexes... l'évaluation des conséquences de nos actes chimiques intentionnels n'est toujours pas mise en oeuvre.

Ce jugement sur les risques est généralisable : <<At present, accurate prediction of the effects of toxic substances on ecosystem properties is impossible. One begins with a limited set of laboratory data composed of toxicity tests on single species. These tests are poorly designed for extrapolation to the field because the mortality of organisms in a laboratory system may bear little resemblance to their response in the natural ecosystem ... From these laboratory data, one wishes to draw conclusions about effects on socially relevant endpoints which involve complex interactions in the ecosystem, which themselves are far from well understood. Despite the intrinsic difficulty of the task, there is a critical need to estimate potential impacts. The need is particularly critical for evaluating new technologies such as synthetic fuel processes>> O'Neil *et al.*, 1982.

Ce n'est pas faute de souhaiter une méthodologie adéquate : c'est faute d'avoir voulu réunir les moyens de son élaboration. Les méthodes actuelles visent après création de nouvelles molécules :

1) d'en rechercher les divers usages potentiels notamment par des méthodes de criblage (essais expérimentaux simples de laboratoire),

2) si une propriété pesticide intéressante est trouvée, d'étudier la faisabilité économique et technique de la production de la molécule (étendue du marché, coût de la mise en oeuvre, ...),

3) si des perspectives lucratives sont dégagées, de préparer le dossier d'homologation pour les divers pays où il existe un organisme de contrôle (commission d'homologation).

Pour ce dernier objectif, des tests et essais "de laboratoire" doivent établir les niveaux de toxicité (toxicologie classique vis-à-vis des composants "intéressants" : manipulateurs, plantes ou animaux protégés par le produit) et l'efficacité vis-à-vis de la cible (le ou les nuisibles). Récemment quelques aspects dits "écologiques" ont été en outre pris en compte et certains tests d'"écotoxicité" improprement dénommés, car pratiqués hors champ écologique ; ce sont des essais, standardisés en microcosmes, portant sur des organismes non impliqués directement dans le schéma économique (p. 401).

Ainsi des molécules, souvent complexes, susceptibles de réactions chimiques diverses avec de nombreuses autres molécules (par "biodégradation", *sic* !) sont-elles autorisées à l'usage sur la base de quelques études sectorielles réductionnistes produisant essentiellement des estimations statistiques de potentialités hors des réalités du champ écologique.

Ces diverses modalités d'instruction d'une homologation de pesticides résultent d'une approche totalement empirique fondée sur la succession des accidents qui ont mis en évidence l'absence de précautions antérieures. Cette addition de décisions

ponctuelles pragmatiques a l'avantage de se justifier socialement par ces accidents et l'inconvénient de n'être fondée que par ceux-ci.

Par contre, toutes conséquences, même importantes mais pernicieuses, échappant à un système d'interprétation cause-effet simpliste, ne peuvent être ainsi prises en compte. En d'autres termes, les conséquences des multiples actions du complexe moléculaire (somme des molécules) issu de l'acte (p. 272) "apport de pesticide" dans les très complexes et très divers agroécosystèmes restent inconnus et totalement inappréciables.

Alors que les études relatives au point 3) constituent un coût marginal par rapport à l'ensemble des recherches nécessaires aux points 1), 2) et des coûts de mise en production et de commercialisation, aucune approche logique des risques sur systèmes écologiques n'est pratiquée alors qu'elle est possible notamment pour la sélection optimisée des caractéristiques étudiées (p. 378) et par le choix des lieux d'études les plus informatifs (p. 380). On devrait pouvoir pratiquer une prédiction sur cause future (p. 494) avant la mise sur le marché. Ces options logiques pouvant être encore améliorées par une justification affinée tenant compte du champ d'application du produit, par exemple grâce à un Système-Expert (p. 428) qui pourrait prendre en compte une connaissance des mécanismes majeurs d'action des produits sur divers niveaux d'observation des systèmes écologiques tels les mécanismes biochimiques (cancérogénèse, troubles physiologiques par blocages enzymatiques, par affaiblissement face aux "stress" pathogènes, ...), les mécanismes génétiques (dont la mutagenèse, ...), les conséquences démographiques (développement de souches résistantes, notamment) et les mécanismes écologiques (par blocages fonctionnels, perturbations systémiques, y compris dégradation de sols, ...).

A cet égard, le remarquable article de synthèse de LEFEUVRE (1986) témoigne à la fois de l'absence d'une intégration systémique et de l'évolution de cette approche. **<<Les recherches consacrées à la dispersion des pesticides dans l'environnement n'ont réellement commencé qu'après avoir constaté que ces produits avaient contaminé de vastes zones de la biosphère non directement soumises aux traitements ; (JAMET, 1983). Depuis 20 ans environ, parallèlement aux programmes de surveillance, des études sont réalisées en laboratoire et dans les conditions naturelles pour connaître :**

- les mécanismes responsables de la dispersion,
- les quantités transportées,
- la nature chimique des molécules entraînées (molécules menées et/ou métabolites),
- le comportement des pesticides dans les écosystèmes où ils parviennent.

C'est en se basant sur une telle approche que l'on est insensiblement passé de la toxicologie à l'écotoxicologie créée par Truhaut, Jouany, Ramade...> >.

C'est au contraire en partant des systèmes écologiques que devraient être déduits les compartiments-clés hiérarchisés témoignant de l'effet des produits concernés sur ces systèmes, puis des expériences de contrôle (toxicités, accumulations pourraient aider à vérifier les mécanismes en cause et finalement les homologations devraient s'appuyer sur cette approche systémique complète d'étude de potentialités. C'est l'inverse qui est fait.

Par exemple, le sol, réceptacle gravitaire quasi inévitable des produits phytosanitaires n'est étudié que de façon anecdotique et seulement pour certaines de ses propriétés non intégrées. Ainsi l'état de ses organismes sous traitement n'est étudié que de façon sporadique et sans aucune hiérarchie systémique explicite (Edwards, 1973). On pratique, encore des dosages directs du toxique, rares car difficiles et exprimés en fonction d'un contenant hétéroclite, le sol (c'est le poids d'un produit rapporté à celui de son flacon 1), et sans tenir compte par exemple de la concentration dans la principale source alimentaire carnée des vertébrés (les lombriciens : GRANVAL, 1988) dont on constate, par ailleurs, l'intoxication. Les lombriciens pourraient facilement constituer un observatoire de la biocirculation effective des produits (rapportée pondéralement à une constante) dans le sol et depuis

le sol vers les vertébrés (et un nombre inconnu d'invertébrés). Les effets systémiques sont dits "secondaires" (CHAMBON, 1982). En fait, il y a carence sur tous les plans : parcellisation, inadéquation de nombreuses techniques, expressions impropres des résultats et des observations conduites.

<< Malgré toutes les précautions prises avant de donner l'autorisation de commercialiser un produit, ... il existe en effet une marge importante d'appréciation entre l'analyse des risques telle qu'elle peut être perçue par le toxicologue confiné dans son laboratoire et celle que peut prévoir un écotoxicologue capable de mettre en évidence l'impact d'un insecticide sur les écosystèmes complexes interactifs qui constituent notre biosphère >> (LEFEUVKE, 1986).

On ne peut en effet, scientifiquement, ne considérer que les modèles de laboratoire validés sur les systèmes réels. Plus qu'un problème d'appréciation, il y a inadéquation. On ne mesure pas une distance avec un décalitre !.

3. Constats systémiques de vacuité des connaissances

Synthétiser les connaissances c'est rassembler des données obtenues, à partir de points de vue particuliers, en ensembles plus globaux et les interpréter comme un tout. Ceci ne garantit en aucun cas que cette somme d'approches restreintes aborde de façon homogène un objet d'étude plus général.

En fait il y a inversement nécessité d'acquérir des données homogènes sur la portion du champ écologique qui englobe les approches particulières pour tester leur validité. Les exemples traités ci-dessus révèlent des carences de connaissances relatives à des composants essentiels aux systèmes (études écologiques des racines, des renouvellement de nécromasse et de leur distribution, du rôle des lombriciens) et aux liens entre composants. Par exemple le lien "inattendu" entre traitement pesticide et érosion découle de la systémique et non directement d'un discours sur les variables d'état "évidentes" perceptibles par un spécialiste. L'approche systémique révèle les déséquilibres graves des connaissances et modes d'appréhension.

Rien ne garantit que des approches restreintes peuvent s'intégrer dans un tout décrit de façon équilibrée. Rien ne garantit que les spécialistes pouvant étudier des aspects essentiels existent et donc que ces aspects sont connus et étudiés. L'écologie discriminante en permettant un zoomage méthodique permet de repérer, dans le maillage des relations à partir des connaissances plus générales, la vacuité des connaissances relatives aux sous-systèmes (p. 422). L'organisation des données aux divers niveaux d'observation devrait permettre de substituer aux descriptions empiriques du paragraphe 8.3.2., traitées à titre d'exemple, une méthodologie systémique de détection des vacuités essentielles. Elle obligerait à reformuler la problématique de certaines études. Ces vacuités ont conduit aux situations préoccupantes constatées actuellement. Ce n'est pas à partir de la "méthodologie" actuelle que les carences cesseront.

L'approche systémique peut non seulement remettre en cause le mode d'expression des données classiquement collectées, mais la nature même de l'acquisition des données.

L'approche restreinte conduit à des expressions de résultats cohérents avec le seul domaine d'étude couvert. Ainsi en chimie du sol, toute quantité d'éléments est-elle rapportée classiquement à la masse totale de sol sec. L'ajout d'une perception disciplinaire, celle de l'absorption racinaire qui exploite des volumes de sol, conduit à remettre en cause cette expression omniprésente dans un rapport de la FAO (SILLANPÄÄ, 1982) en proposant, comme première correction, au moins une expression volumique.

De même les expressions de fractions "assimilables" fondées en fait sur des réactions chimiques appliquées à un matériel aussi hétérogène qu'un sol conduisent-elles à essayer de prendre en compte la fraction potentiellement assimilée mais de façon artificielle.

La surveillance de la biocirculation des contaminants dans le sol conduit par contre à privilégier l'expression de ces produits dans la fraction vivante de celui-ci, et par rapport à cette biomasse, indépendamment de l'expression pondérale classique rapportée arbitrairement au sol. Cette dernière expression varie, par rapport à la bioconcentration, par au moins 5 caractéristiques plus ou moins indépendantes (densité, finesse de la "matrice", liaisons chimique et physique à la matrice, extractibilité chimique du produit, distribution de la vie dans le sol : résosol *versus* biosol, p. 145) (BOUCHE, 1988). Il ne s'agit plus de lire les contaminants dans une matrice très complexe de la porosphère mais de focaliser sur la biocirculation effective.

Une expertise des démarches scientifiques décrite exhaustivement en Base de Connaissances révélerait très probablement (l'auteur ne dispose évidemment pas de ce moyen d'appréciation, seul objectif) que, non seulement les oligo-éléments (contaminants ou non), mais les éléments biogènes majeurs ne sont pas connus quant à leur circulation réelle dans les écosystèmes.

La consultation des ouvrages classiques montre que :

- soit nous disposons de modèles conceptuels validés par des modèles matériels (microcosmes) en conditions artificielles, c'est-à-dire des cycles des éléments décrits par des potentialités et non des réalités écologiques,

- soit nous observons *in situ* ces éléments (avec des traceurs) apportés en négligeant la structure fonctionnelle des systèmes écologiques (apport d'engrais ^{15}N sur les systèmes en forme hydrosoluble et non pas marquage dans les systèmes organisés (p. 91, 273) en respectant les formes d'azote à leurs places systémiques).

Nous disposons essentiellement de modèles "validés" sur des modèles ou des expériences par actes (agronomiques) ignorant les systèmes écologiques : pas d'écovalidation. Lorsque, exceptionnellement, cette validation a pu être faite, elle présente des mécanismes étonnants, imprévus dans les modèles conceptuels et matériels (p. 149).

La vacuité des connaissances sur les systèmes écologiques réels peut ainsi aisément et explicitement être mise en évidence : sa réduction effective est la condition première du progrès scientifique et technique (p. 443). On ne peut progresser si nous n'avons pas un tableau hiérarchisé des méconnaissances en partant des lacunes les plus conséquentes vers les plus anodines.

8.3.3. Prédicibilité

L'intérêt de l'étude rationnelle *a priori* est de prévenir des conséquences des actes dans les systèmes écologiques. Beaucoup plus délicate est la prédiction de causes futures (= non pré-existantes) de changements. Celle-ci se présente dans deux circonstances :

- 1) les études de conséquences d'accidents possibles, c'est-à-dire des risques encourus en cas de défaillance des systèmes normalement mis en oeuvre dans un procédé actuel (fonctionnant correctement) ou futur (défaillance potentielle). Cette préoccupation est sous jacente à de nombreuses installations confinées du génie industriel chimique, physique, voire biotechnologique (*e.g.* germes manipulés),

- 2) les prédictions d'impact d'un nouvel aménagement, ou d'un nouveau produit ou d'une nouvelle procédure industrielle (dont l'analyse d'impact environnemental est possible) conduisent à se poser le problème des conséquences de ces installations ou du lancement sur le marché d'un nouveau produit, avant l'existence de ces causes potentielles de changement environnemental.

On pourrait ajouter à ces deux cas réellement opérationnels celui des dégradations en cours dont l'amplitude s'étend (tel l'accroissement du CO_2 atmosphérique) mais ici la recherche des causes effectives (et non apparentes) permet de porter remède et la recherche sur documents antérieurs permet de comparer les systèmes écologiques à partir de DICs beaucoup plus objectives que les DEPs des modèles prédictifs.

Les prédictions d'impacts d'aménagement ou de produits nouveaux sont particulièrement délicates et ne peuvent guère que se fonder sur des méthodes de simulation en laboratoire (tests de toxicité, simulations en microcosmes ou sur ordinateur) ; elles sont par nature non validables au champ écologique avant la mise en oeuvre de ces actes.

Il semble qu'une approche rationnelle serait toutefois possible en s'appuyant sur un Système-Expert lui-même fondé sur les pratiques antérieures d'usage d'autres produits ou d'autres réalisations dans le champ écologique. Ce Système-Expert rendant disponible les résultats de modélisations par microcosmes et ISTECs écovalidées sur des situations antérieures en systèmes réels.

Par exemple, l'introduction sur le marché d'environ 200 nouveaux produits chimiques annuellement a conduit le service de protection de l'environnement et des consommateurs (DG XI) de la CCE à promouvoir des études "écotoxicologiques" (p. 480) des effets de ces produits sur quelques composants de notre environnement.

Parmi ceux-ci les lombriciens ont été retenus, notamment en tant que première biomasse animale cohabitant avec l'homme.

En pratique, les études ont dû être, dans un premier temps au moins, réduites à un essai de toxicologie classique en laboratoire sur une seule espèce de lombricien dans une mixture artificielle de sols ou dans un substrat totalement synthétique (ART1SOL). Ces essais portent sur la toxicité létale à court terme (= aigue).

Quelle est la valeur prédictive d'un tel test, qui serait également applicable aux pesticides, avec lesquels il fut d'ailleurs mis au point ?

Un produit peut être toxique vis-à-vis de ces animaux sans les affecter *in situ* ou en les affectant seulement partiellement.

Car ces produits peuvent par exemple se dégrader avant de les atteindre en raison de la saison (en été, ces animaux sont en léthargie en profondeur) ou en raison du mode d'application (poudrage sur surface foliaire non suivi de pluies). Ces produits peuvent être beaucoup plus toxiques qu'escompté en raison de bio-accumulations successives non perceptibles dans les tests, ou d'effets sur la démographie (croissance, reproduction) à des doses non létales. Le mode d'apport (dans le sol, sur le feuillage, la saison, le type de faune) implique que certains lombriciens consommant des feuilles mortes ou vivant dans celles-ci sont beaucoup plus exposés en général que ceux vivant en profondeur. Les incidences climatiques et saisonnières, les types de liaison physique avec le sol, etc., peuvent donc totalement inverser les effets d'un produit pur rapport aux potentialités observées dans le test de laboratoire.

Enfin, les conséquences écologiques des modifications démographiques qui, dans le cas des lombriciens, commencent à pouvoir être estimées et validées varient en fonction de l'état antérieur du peuplement, c'est-à-dire de l'impact sur leur démographie de la succession des actions humaines. Par exemple, un même traitement pesticide affectant une fraction d'une population importante est tolérable alors que ses conséquences risquent de devenir irréversibles sur un peuplement exsangue.

Il semble que, au moins temporairement, des Bases de Connaissances sur les impacts des divers produits déjà utilisés puissent aider à traduire l'impact des variables interférant entre le produit étudié en conditions artificielles, et des modalités futures similaires d'application d'un nouveau produit. La prédictibilité serait donc ici fondée sur l'analogie avec des produits agissant déjà dans le champ écologique (Bouche, 1984) (p. 494) et sur l'expérience acquise lors des démonstrations au champ.

Malgré le développement de modèles sur les risques (O'NEILL *et al.*, 1982), les études de conséquences d'accidents, surtout à très hauts risques, sont tout à fait impraticables dans le Champ écologique ; elles ne peuvent être conduites que par simulation en microcosmes... en espérant que celles-ci simulent correctement certaines circonstances écologiques (SCHAERER, 1983). Il est clair que la réalisation de

microcosmes très coûteux pouvant incorporer un nombre croissant de variables simulées (dont certaines testables dans le champ écologique) devrait réduire le risque prédictif encouru (p. 401). La possibilité d'écovalider ces modèles existe en substituant si possible aux éléments dangereux des analogues observables au champ. Ici la possibilité d'écovalidation totale fait défaut... sauf en cas de catastrophe. La mise en place de réseaux de surveillance devrait pré-exister pour l'exploitation instantanée de ces catastrophes en tant qu'expériences en vraie grandeur.

8.3.4. Gestion intégrée des richesses de l'espace

Le souci de choisir les meilleures techniques et les moindres risques relève de la prédictibilité (p. 416) relative à chaque technique. Toutefois, la mise en oeuvre de chaque technique se fait sur des portions de l'espace-Lemps.

Le choix des points d'application d'une série de techniques dans l'espace implique un choix socio-économique de l'affectation de cet espace s'appuyant sur une évaluation de la "richesse" de celui-ci à la fois pour l'exploiter au mieux et pour préserver ou ménager cette richesse en sélectionnant les techniques les plus pertinentes pour cet objectif.

Opiner favorablement sur la "richesse" ou la "valeur" d'une portion d'espace est la préoccupation des divers décideurs opérant sur cet espace. Cette préoccupation, traduite fréquemment par des demandes adressées aux écologues, recouvre toutefois trois exigences non strictement superposables :

- la richesse socio-économique instantanée,
- la richesse en diversité (biologique),
- la richesse en produits par unité de temps (= fertilité).

1. La richesse socio-économique instantanée ou exploitabilité

Dans celle-ci l'appréciation, totalement extérieur au système écologique, pré-existe. (l'est à partir de celle-ci (par exemple la possibilité de faire une monoculture céréalière continue, ou une extraction minière) que l'espace est apprécié. Les aptitudes et coût de mise en oeuvre des techniques à sélectionner vis-à-vis de ce milieu, constituent le critère de décision. L'approche écologique intervient pour la fourniture de données sur l'état initial du milieu et la valeur prédictive de systèmes similaires pré-existants, mais aussi en informant sur le système donc sur l'ensemble des richesses exploitables, hors choix sectoriels, par exemple sur la possibilité de se créer, outre un revenu depuis de produits agricoles, une richesse par la location de chasse grâce à une sélection rationnelle des actes agronomiques. La valeur de telles appréciations sur la richesse de l'espace est étroitement inféodée au jugement socio-économique et en a le caractère extemporané.

2. La richesse biogéocénitique ou diversité

Sous des demandes diverses - tels la protection d'espèces rares, l'agrément esthétique de la variété du paysage ou la conservation de la richesse en génotypes utilisables potentiellement à des fins économiques - est posé le désir d'apprécier la richesse relative en éléments divers. C'est l'hétérogénéité, qui est considérée comme favorable, en ce sens qu'elle permet dans une même portion d'espace d'accumuler une grande diversité prise au sens d'information (p. 88, 387).

La recherche de tels moyens d'appréciation part souvent de points de vue par trop spécialisés pour représenter une réelle mesure de la diversité.

La diversité, en tant que richesse biologique, est en effet souvent évoquée pour assurer une protection contre l'uniformisation résultant des actes de l'homme simplifiant à la fois les écosystèmes (nivelage, éradication des organismes non productifs, contrôle permanent des conditions mésologiques pour une production), et les cultivars ou races de plus en plus génétiquement uniformisés par sélection artificielle.

L'appauvrissement des richesses biologiques de la planète est un problème abordé sur deux plans 1) les espèces identifiées comme économiquement importantes sont appauvries par le succès temporaire de seulement quelques races ou cultivars : ici la réponse s'impose par la création de banques de gènes monospécifiques, 2) la considération que nous ne pouvons pas savoir ce qui est *a priori* important dans les divers stocks d'espèces présentes dans le milieu, dans la diversité des écosystèmes de ces espèces, dans la richesse du génome des individus de ces espèces... pour leur futur usage, ou pour la simple maintenance de notre environnement. Ce deuxième problème trouve concrètement sa réponse dans le fait que les organismes, en tant que sous-systèmes dépendent, à tous les niveaux de leur évaluation, de la diversité de leurs adaptations à des milieux globalement diversifiés ou relativement monotones (p. 231). Or cela se mesure.

Nous avons vu (p. 380) que nous pouvons aujourd'hui, à condition de collecter une quantité d'information excessive (redondante), apprécier globalement la diversité relative de points-holocénoses par la mesure de leur quantité d'informations.

Les recherches des fondements objectifs d'une telle appréciation sont aujourd'hui accessibles. Elles portent essentiellement sur les états des systèmes écologiques dont on peut optimiser le choix des caractéristiques. En conservant la diversité globale entre point-holocénose on conserve nécessairement les diversités biologique et génotypique qui en dépendent.

3. L'intensité fonctionnelle des écosystèmes ou fertilité

Localement le fonctionnement d'un écosystème dépend de son activité, c'est-à-dire des cinèses relatives aux échanges tropho-hydro-énergétiques. Celles-ci dépendent de la température (régulant la vitesse des réactions (bio)-chimiques des systèmes), de l'humidité et de la disponibilité en éléments biogènes constitutifs de la matière organique formée et renouvelée dans ces systèmes.

Mesurer globalement ce taux de renouvellement de la matière organique c'est apprécier l'aptitude du système écologique à offrir, aux divers niveaux de son organisation, la possibilité d'effectuer un prélèvement sur les divers produits organiques.

Il s'agit, en dehors de toute considération économique de coût de prélèvement (y compris des coûts des conséquences de cette récolte) et en dehors de tout choix d'un prélèvement spécifique, d'apprécier si les milieux renouvellent lentement ou intensivement ces masses organiques (biomasse et nécromasse). Un tel critère permet d'apprécier synthétiquement la possibilité d'exploiter ces milieux, que ce soit pour la récolte de production végétale agricole, le support d'élevages ou la chasse-cueillette de produits abondants et divers (chasse, pêche, tourisme). Ces potentialités pouvant, selon le contexte socio-économique local, être privilégiées l'une au détriment d'une autre ou plus logiquement ensemble, en synergie.

La recherche écologique systémique devrait permettre de sélectionner des composants systémiques dont la maintenance (dont l'état) est étroitement dépendante de ce renouvellement de la matière organique. Il faut écarter les compartiments-réservoirs dont l'état peut refléter une situation accumulée (comme la biomasse forestière), les composants techniquement non mesurables avec certitude (comme la biomasse microbienne), les composants trop spécifiques dont la carence est largement compensée par la présence d'autres composants (tel le nombre de mésanges, ou d'un Collembole). L'idéal est un compartiment largement dépendant globalement et non spécifiquement des apports nutritionnels végétaux (= efficacité photosynthétique), des activités microbiennes générales et ayant peu de "réserves" créant une inertie temporelle entre observation et fonctionnement réel.

En milieu terrestre, les lombriciens, composés à 72 % de protéines, omniprésents et relativement échantillonnables objectivement, semblent *a priori* un

bon indice de cette fertilité (fig. 6-8, p. 371). Des recherches nombreuses et circonstanciées en ce domaine devraient fournir les moyens d'une appréciation de tels indicateurs (notamment en tenant compte des conditions hygrothermiques climatiques accélérant ou freinant par ailleurs l'activité des systèmes écologiques) (p. 109, Bouche, 1987).

4. Les "valeurs" des milieux

Notons que les trois "richesses" <<exploitabilité, diversité et fertilité> > relèvent de trois logiques indépendantes qui peuvent socio-économiquement être opposées ou au contraire mutuellement confortées par des synergies.

Les trois critères ne font pas appel aux mêmes "jugements de valeurs" et traduisent trois richesses distinctes qui toutes trois peuvent influencer les décideurs.

La fertilité mesure la possibilité pour l'homme, à partir du fonctionnement intrinsèque des systèmes écologiques, de dévier une ou plusieurs richesses en tant que produits de la pêche, de la chasse, de cultures ou/et d'élevage. Cette exploitation, si elle est conduite en optimisant le système (et non contre le système), peut minimiser les coûts et permettre plusieurs exploitations simultanées du milieu (tels l'agriculture, la chasse et le tourisme).

En utilisant les systèmes et en tenant compte de leur fertilité (propriété intrinsèque) elle permet un support maximum de l'homme avec peu d'intrants par actes (= exnèats socio-économiques).

La fertilité peut être associée à une grande diversité, ou non : des milieux pauvres peuvent recéler de multiples micro-habitats hébergeant de nombreuses espèces tolérantes et des milieux riches peuvent être relativement monotones. Cette diversité doit toutefois être prise en compte à la fois comme maintien d'un potentiel génétique et comme source d'agrément dans une optique de conservation, mais aussi comme moyen du maintien d'alternative économique (pour une même fertilité) ; l'exploitation peut condamner la flexibilité des systèmes par perte de composants exprimés par la diversité.

L'exploitabilité est un jugement privilégiant, parmi les propriétés de l'espace, celles permettant une réussite économique de certains types d'exploitation de cet espace. Un tel jugement peut tenir compte de la fertilité ou/et de la diversité dans la mesure où ils sont valorisables dans une "filière" (par exemple le premier en foresterie, le second en tourisme) mais aussi totalement les ignorer (pour une exploitation minière) ou les réduire à quelques caractéristiques (pente, granulométrie, régularité climatique) dans une culture à forts intrants par actes, dite "intensive".

Exploitabilité, diversité et fertilité constituent un Cryptique susceptible d'informer le décideur. L'exploitabilité dépend de choix socio-économiques et de la prédictibilité (p. 483) sur les techniques mises en oeuvre - diversité et fertilité étant des jugements globaux portent 1) soit sur des modes d'exploitation intégrés (chasse, culture, élevage, cueillette, tourisme, pêche), 2) soit sur la conservation de patrimoines notamment biologiques (diversité) et d'alternative économique (fertilité). L'écologue assure l'intégration des informations sur les systèmes écologiques, y compris sur les actes et permet aux décideurs de fonder leur "jugement de valeurs" non plus depuis une "filière" unidirectionnelle mais depuis une systémique intégrée.

8.3.5. Du plausible à l'évaluation écologique rationnelle

L'étude *a priori* n'est souvent pas encore possible. L'accumulation en Base de Données Relationnelles des DICs, seules objectives, et les interprétations des divers experts-spécialistes (qui sont sollicités et opinent çà et là sur divers problèmes relatifs à notre environnement) en BdC ne sont qu'exceptionnellement mises en oeuvre. Ces DiCs ne sont pas encore valorisées en Base de Connaissances reliant les algorithmes d'interprétation aux faits selon les heuristiques proposées ou démontrées par les experts.

Nous sommes chronologiquement à l'orée de la mise à disposition par des interfaces informatiques homme/machine des Systèmes-Experts du savoir accumulé et de la critique améliorant itérativement le savoir non perdu (perdu par exemple par le départ à la retraite de l'expert !).

Nous sommes confrontés à des problèmes multiples, divers et complexes... faut-il changer de stratégie opérationnelle, passer du sectoriel à l'intégré ?

C'est sur un article récent d'écologie concrète (LILIN et PAULET, 1987), que je découvre fortuitement en terminant cet ouvrage, que j'illustrerai mon propos à cheval entre ces deux époques, entre les deux paragraphes 8.3. et 8.4. (études *a priori* et *a posteriori*), entre l'intégré et le sectoriel. Cet article est assez ouvert pour que, ô miracle, des non spécialistes, contre toute attente, n'ignorent pas totalement le rôle des lombriciens (p. 479) dans un problème affectant peu ou prou d'impressionnantes surfaces cultivées.

Cet article, que je cite dorénavant, est caractéristique de ce qui nous assaille et est évidemment une étude *a posteriori* sur un problème local : les < **inondations catastrophiques inquiètent les élus de Montreuil-sur-Mer** > ... et entraînent une enquête et la mise en évidence, pour ce phénomène, de l'importance des précipitations, de l'érosion des sols et des actes humains dans le paysage. Ces auteurs donnent à leur étude sur l'érosion des sols une dimension temporelle, historique et spatiale (cartographique) et montrent la difficulté d'apprécier celle-ci en raison de caractéristiques aléatoires et "fugitives" (les évidences étant effacées par les façons culturelles) car l'érosion en cause n'est pas celle des modifications géomorphologiques majeures en montagne, ni celle des effets des vents, mais celle, plus insidieuse et banale, des ruissellements de boues Huantes en surfaces subhorizontales.

Les modalités culturelles (grandes cultures intensives en sols peu argileux), pédologiques (sols légers peu stables des vieux socles hercyniens), géomorphologiques (vignobles penlus) et climatiques (pluies torrentielles méditerranéennes) sont ensuite évoquées qualitativement par les auteurs.

Le cadrage historique montre que ce phénomène ancien a eu des causes variées depuis... la mise en valeur des terres par les premiers défricheurs, mais que << **de tout temps, agriculteurs et collectivité ont élaboré et mis en oeuvre des réponses d'une grande diversité pour limiter les phénomènes érosifs : la production de ces réponses est un processus social continu car les transformations de l'agriculture ont périodiquement renouvelé le problème de l'érosion, nécessitant chaque fois la production de réponses spécifiques** > >. Toutefois les "experts" disparaissent, les conséquences d'accidents érosifs s'oublient et < **Par ailleurs, la mémoire collective est caractérisée par une certaine capacité d'oubli** > >.

Ce type d'oubli se retrouve aujourd'hui. << **Le recul de la mise en valeur agricole observée en montagne comme la spécialisation herbagère de certaines régions jouent dans ce sens, (une réduction du risque érosif)** >>. << **Mais simultanément nous observons une tendance à l'augmentation de l'érosion des sols dans certaines régions de grandes cultures et de vignoble. Cette aggravation de l'érosion des sols cultivés dans différentes régions de France peut être mise en relation avec un certain nombre de changements qui affectent le paysage rural et les pratiques agricoles** >>. Ainsi les auteurs sont ils conduits à aborder des problèmes relatifs à la réaffectation des parcelles (p. 501), aux restructurations paysagères locales (p. 509), à l'aménagement des sols et du territoire puis plus spécifiquement à la dégradation physique des sols (p. 517). Ceci en relation avec les techniques réduisant l'impact de

l'érosion (sous-solage, drainage, et non labour) et les agrotechniques récentes (fertilisants, pesticides) dont certaines éliminent les vers de terre et entraînent < < **une diminution assez généralisée de la teneur en matière organique** > > (p. 478).

Les auteurs soulignent aussi un changement d'attitude (perte de mémoire ?) < < **D'une manière générale, des préoccupations de rentabilité à court terme, responsables de l'accroissement des fertilisations minérales et des traitements phytosanitaires, se sont substituées au souci d'entretien à long terme de la fertilité des terres** > > < < **La rapidité des progrès techniques conduit à une spécialisation des structures d'encadrement de l'agriculture raisonnant de plus en plus par "filières de production" plutôt que par système de production. L'intégration spatiale des transformations techniques, qu'il s'agisse des assolements ou des techniques culturales, retient peu l'attention des agents de développement agricole et des agriculteurs eux-mêmes. On observe peu de réflexions et d'actions visant à induire une adaptation des nouvelles techniques aux contraintes naturelles des terroirs et se préoccupant de la gestion à long terme de l'eau, des sols et plus généralement de la fertilité des milieux** > >.

Les auteurs analysent ensuite les conséquences du phénomène érosif : 1) dégâts des crues catastrophiques et leur mécanisme, transports massifs de polluants physiques (solides en suspension envasant les cours d'eau), chimiques (phosphore, dont 40 % proviennent de l'agriculture et favorisent l'eutrophisation, azote, résidus des pesticides, ...) y compris vers la nappe phréatique, 2) dégradation des sols par érosion, ablations et dépôts, exportation sélective des éléments fins et légers (argiles, humus) modifiant la composition du sol lui-même, etc...

Cette étude de cas témoigne d'une motivation (crue catastrophique motivant les autorités locales) permettant l'énoncé d'une problématique (l'érosion des sols) puis d'un objectif plus restreint (érosion des sols cultivés) replacée dans son cadre écosystémique (pédologique, climatique, végétation, ...) et celui des actes humains (agricoles, aménagement du territoire, drainage, ...) et dans son fonctionnement (dégradation structurale, p. 519, érosion, pollution, transformation).

Cette étude témoigne aussi du très grand nombre d'intervenants, d'experts, d'analystes, d'agents de développement, d'agriculteurs... chacun ne pouvant percevoir que quelques aspects sectoriels du système local en cause. Ceci entraîne une certaine "capacité d'oubli" de la mémoire collective.

De toute évidence personne, pas même un groupe, ne peut aborder un tel sujet **avec les méthodes actuelles**. Ces problèmes, aux conséquences souvent catastrophiques (cf. RAMADE, 1987), doivent cependant être traités afin d'élaborer une réponse spécifique, non seulement au niveau local de cette étude, mais au plan général.

Inversement, ce sujet n'est pas indépendant de décisions socio-économiques (— non écologiques) mais aussi de la multitude des décisions de mise en oeuvre des actes des itinéraires techniques et aménagement pris séquentiellement "par filière" pour "résoudre" un problème spécifique sans évaluation écologique de "toutes" les conséquences. En outre ces décisions et actes engendrent des conséquences très diverses hors du phénomène érosif abordé par les auteurs (CO₂, p. 513 ; nitrate, p. 518).

Il est évident que la gestion moderne des données écologiques objectives (DICs), quelles que soient leurs nature et motivation initiale d'acquisition, en Base de Données Relationnelles, permet seule de mobiliser à la demande le savoir objectif lié à de telles problématiques. Il est non moins clair que les interprétations d'experts devraient être mobilisées non seulement pour interpréter ce phénomène mais ultérieurement pour associer tout acte à ses conséquences pondérées par les propriétés connues du terroir local. Seul un (ou des) Système(s)-Expert(s) permettraient d'éclairer un décideur sur les conséquences "oubliées" de l'acte qu'il projette d'effectuer. C'est la seule façon concrète de mobiliser tout le savoir acquis ou inféré.

En fait, il apparaît aujourd'hui à la fois nécessaire et pour la première fois possible d'effectuer une évaluation écologique de nos actes sur notre environnement, au mieux et, à partir d'une connaissance intégrée de celui-ci, d'en déduire des modalités d'actions (actes) et de gestion tenant compte des diverses richesses (p. 485).

8.4. L'approche traditionnelle *a posteriori*

8.4.1. Contexte

Deux attitudes intellectuelles co-existent dans notre façon d'agir sur notre environnement : l'écosphère. Une démarche logique déduite d'une connaissance (acquise fortuitement ou à la suite de recherches fondamentales ou appliquées) permettant de mettre en oeuvre une technique souvent précise. Quel est l'homme qui a découvert les propriétés de reproduction des graines ? Nul ne le sait, mais la technique du semis est logiquement déduite d'observations. Puis, la sélection parentale des reproducteurs s'est déduite empiriquement et logiquement pour retenir les semenciers.

L'importance de la nutrition minérale pour les plantes a permis à LIKBIG au XIX^{ème} siècle de prôner l'usage d'engrais minéraux (p. 230). La découverte des lois de la génétique a d'abord rationalisé les très anciennes méthodes de sélection puis inspirer des objectifs de manipulations génétiques au fur et à mesure des progrès techniques les permettant. Il s'agit d'applications de connaissances.

Mais simultanément, et en co-existence, ces applications se font en aveugle sur les écosystèmes (agro-écosystèmes connus éventuellement) en tant que systèmes. La mise en place d'un semis implique presque toujours desherbage et travaux aratoires, dont toutes les conséquences sont loin d'être établies, la mise en oeuvre des engrais se fait sur un système-sol très complexe et variable qui va être une courroie de transmission entre engrais et plantes : les modalités de cette transmission nous échappent en grande partie. Dans un premier temps, l'approche empirique sur de tels systèmes complexes prévaut. On essaie... et on voit si, malgré notre ignorance, cela "marche". Si oui, on étend les essais à d'autres conditions d'application pour en connaître les limites mais non les mécanismes.

Il est inutile d'opposer les deux approches : tous nos progrès techniques, à commencer par l'augmentation spectaculaire des rendements agricoles, en découlent, la plupart de nos ennuis environnementaux, telles la dégradation de sols ou les pollutions, en résulte également. Mais il est clair que les ennuis ne viennent pas de l'approche raisonnée mais du tâtonnement empirique.

Par une série d'interprétations morcelées, l'usage de l'espace s'est développé essentiellement sur la base à la fois d'un progrès technique considérable et d'une appréciation empirique extrêmement fruste. Cet usage se fonde sur la comparaison des résultats économiques dans un très court terme, en se privant de toute compréhension réelle des conséquences de ces techniques à l'échelle des syntégrons, subécosystèmes, parcelles, régions ou de l'écosphère.

Cela signifie clairement la "prise de risques" au niveau moléculaire (par exemple, cancérogenèse due aux dégradés de pesticides ou aux effluents industriels), au niveau symbiotique (par exemple, régression des fixateurs d'azote), au niveau synlégron (par exemple, éradication lombricienne), au niveau parcellaire (par exemple érosion) et au niveau planétaire (par exemple, effet de serre). En outre, il y a enchaînement croissant de la nécessité d'actes "compensant" les effets négatifs d'actes précédents tel l'enchaînement excès d'engrais —► maladie pathogène végétale —«-traitements fongicides—► éradication d'entomophlores et des agents détruisant les inoculum pathogènes —► traitements fongicides et insecticides croissants — éradication des prédateurs polyphages—► accroissement des mollusques phytophages —► etc. etc. Encore n'est-ce qu'une des chaînes sur laquelle se branche, par exemple celle de la dégradation des sols et de l'érosion (p. 488, 519).

Faute de systémique opérationnelle, la puissance croissante des moyens a été mise en oeuvre en aveugle sur les systèmes écologiques où leurs conséquences sont considérables. Inévitablement, des phénomènes "imprévus" obligent à prendre des mesures vis-à-vis des causes identifiées (si elles le sont).

En fait, l'imprévu était souvent prévisible parfois et prévu, car même en absence de moyens opérationnels, à la mesure des multiples actes effectués par l'homme, un simple raisonnement systémique permet un pronostic, certes imprécis qualitativement et quantitativement, mais suffisant pour informer en principe les décideurs. Malheureusement, ces décideurs sont également influencés par des groupes de pression disposant de moyens matériels et intellectuels (= les "preuves" scientifiques et techniques des approches parcellisées ou/et non contrôlables dans le réel où vit l'homme) auxquels aucune contre-expertise fondée sur la systémique écologique rigoureuse ne peut être opposée, faute d'un avancement suffisant de la discipline et corrélativement de ses moyens.

Dès lors l'étude de PIMENTEL *et al.* (1980), démontrant la fragilité des fondements économiques et sociaux de l'industrie phytosanitaire, n'a pas prévenu Bhopal, et ne limite pas les pertes humaines continues de cet usage dans le Tiers Monde (BOUGUERRA, 1986). Dès lors les alarmes des ingénieurs du nucléaire n'évitent pas les dommages des accidents, dont ceux portés tardivement à la connaissance du public (Windscale, Three Miles Island, Tchernobyl, ...).

Dans les systèmes écologiques la situation est perçue selon quatre niveaux :

- Des actes sont effectués mais leurs conséquences ne sont pas étudiées.
- Des conséquences sont perçues mais n'entraînent pas d'études adéquates, car ces études sont confiées à des "spécialistes" confondant "évidences" et preuves causales.
- Des conséquences sont perçues et entraînent une recherche des causes.
- Des conséquences, même très importantes, sont inaperçues car leurs effets sont dilués dans un domaine confus ou/et il y a ignorance car les moyens d'observation n'existent pas. Ex : le difficile lien entre épidémiologie des cancers et carcinogènes.

Dans un tel contexte, il est important de développer les constats écologiques par une surveillance du milieu, puis par une recherche empirique expliquant dans les systèmes écologiques les causes des modifications constatées afin d'en tenir compte au niveau des actes futurs. Cette approche offre fondamentalement l'inconvénient d'être un constat, lorsqu'elle est programmée, souvent trop tardif pour modifier nos actes. Cette recherche *a posteriori* permet même de différer toutes mesures sérieuses lorsque l'on ne désire pas concrètement agir car elle sert alors d'excuse absolutoire.

Toutefois, on peut chercher à optimiser les constats, et si possible à remonter aux causes, par les rudiments d'approche systémique disponible.

- Les constats écologiques sont possibles par l'écologie discriminante (p. 422), ceux-ci s'effectuant à des échelles variées et des focalisations diverses, soit face à une situation générale d'interventions humaines nombreuses et diverses, soit face à une application technique intentionnelle particulière.

- L'étude intégrée des systèmes découle des constats et permet de préciser les mécanismes les expliquant. Elle favorise l'optimisation des caractéristiques choisies pour les constats et, en accroissant leur pertinence, permet de modifier éventuellement nos actes à des fins de protection de la nature, d'augmentation de production, de restauration des sites dégradés, etc.

Notons aussi que la recherche de causalité, dans les systèmes écologiques, est d'autant plus artificielle que tout système peut être regardé comme sous-système par rapport à son sur-système. Par contre, les approches appliquées impliquent une relation causale (une cause pouvant être la somme de causes) car les actes résultent de motivations externes aux systèmes écologiques, quels qu'ils soient, et déclenchent comme effets des modifications systémiques (p. 28, 472).

Dans tous les cas les études préliminaires a) sur données préexistantes similaires (en BDR), b) sur connaissances antérieures bibliographiques, c) éventuellement par un pré-échantillonnage, devront permettre l'optimisation du rapport élaboration/coût. Que ce coût soit social, ou strictement monétaire, l'écologue se doit d'accroître son efficacité économique dans ces recherches appliquées, leur

développement dépendant de la pertinence des choix d'options et propositions (p. 41) qu'il pratique.

Celle efficacité nécessitera souvent le développement de connaissances fondamentales ; celles-ci devant (à la différence des motivations de recherches fondamentales) se justifier à partir de carences prouvées dans la démarche d'interprétation déjà pratiquée, au moins au stade de modèles conceptuels.

A ce stade, l'identité apparente de certaines recherches fondamentales et finalisées diffère surtout par leur justification explicite immédiate. Détourner des moyens à objectifs utilitaires vers des recherches fondamentales non justifiables n'est pas renforcer l'écologie mais en réduire la crédibilité. Inversement, refuser des moyens à la recherche de base, indispensables à l'interprétation des données liées aux objectifs appliqués, c'est desservir à la fois l'application visée et l'écologie en général.

8.4.2. Motivations des constats écologiques

Plusieurs motivations peuvent conduire à l'élaboration opérationnelle de constats écologiques qui s'inscrivent dans des portions d'espace-temps du champ écologique et dépendent d'objectifs finalisés.

(les motivations regroupées selon divers objectifs finalisés ne constituent pas des catégories s'excluant l'une à l'autre, mais méritent d'être exprimées de façon rationnelle, ce qui est loin d'être le cas dans maintes demandes adressées aux écologues. Ces motivations peuvent être la surveillance écologique, l'identification causale, les conséquences d'actes et les évaluations globales.

1) La surveillance écologique vise à reconnaître les changements (p. 4G) d'une portion du champ écologique. On peut y reconnaître deux objectifs quelque peu distincts :

la) Surveillance de changements en tant que système d'avertissement. Il s'agit d'enregistrements diachroniques et parfois spatiaux dont la sensibilité permet de reconnaître un éventuel changement anormal. Par exemple le contrôle de radioactivité dans certains observatoires de l'environnement.

lb) Surveillance d'un changement déjà identifié, mais effectuée en cours, pour un bilan d'ampleur de ce changement, telle l'évolution actuelle de la pollution (généralement grandissante) des nappes phréatiques.

2) 1. l'identification de coïncidences causes-effets précise, devant un changement nettement perçu (la) et dont l'ampleur est jugée alarmante (lb), les coïncidences, surtout spatio-temporelles, qui pourraient exister entre effets observés et causes supputées de ce changement. Les coïncidences peuvent être mises en évidence par analyse multivariée des descripteurs "causes potentielles/changements constatés" ou par la prise en compte dans le dispositif d'observation des "caractéristiques-causes supputées", alors qu'en surveillance écologique seules les "caractéristiques-effets" sont retenues pour les interprétations.

Souvent la simple cartographie classique constitue une approche empirique permettant une sélection des causes probables. Telle la cartographie des vents dominants en Europe illustrant le lien entre émission de fumées industrielles acides en Europe moyenne et pluies acides en Europe septentrionale et moyenne. Telle la coïncidence temporo-spatiale de l'accroissement de l'usage des engrais hydrosolubles azotés et de la pollution nitrique des nappes phréatiques en zones rurales. Notons toutefois que ces cartes d'état suggèrent mais ne prouvent pas des cinèses (d'éléments) comme causes certaines des effets observés.

Ces constats doivent nécessairement être suivis d'une étude finalisée de systèmes pour préciser la validité des hypothèses sur ces coïncidences et les mécanismes reliant causes et effets, les causes étant des actes initialement extérieurs aux systèmes écologiques spontanés, c'est-à-dire des domaines où notre responsabilité peut (et devrait) s'exercer préventivement (p. 477).

3) Lea conséquences d'actes techniques s'effectuent lorsque la cause est clairement identifiée, car souvent mise en oeuvre intentionnellement à des fins économiques ou/et expérimentales. Le constat écologique portera sur les systèmes écologiques considérés comme effecteurs de la cause mise en oeuvre. C'est le cas au cours d'une étude diachronique d'états pendant laquelle on fait intervenir une cause identifiée, notamment dans le cas de comparaison de systèmes avant et après l'intervention de l'acte ou dans l'étude de l'érosion et de la succession végétale après un déboisement ou après un feu. C'est le cas, lors de la comparaison synchronique de parcelles subissant des itinéraires techniques agricoles différents, des traitements forestiers différents, des manipulations expérimentales différentes. Ce type d'études est opérationnellement très semblable à l'étude rationnelle effectuée avant la mise en oeuvre de l'agent causal, mais ici il n'intervient qu'*a posteriori*.

4) L'évaluation globale. 11 s'agit de porter un jugement de valeur, après constat sur la nature des systèmes, pour juger de la mise en oeuvre d'une politique de protection, de valorisation financière dans une filière économique, de l'abandon d'un itinéraire technique dont les actes liés sont globalement moins performants qu'un autre itinéraire, ... (c'est *a posteriori* le même type de jugement que celui de la gestion intégrée des richesses, p. 485).

8.4.3. Prédictibilité des constats

L'objectif d'un constat écologique doit être également défini en fonction du degré de prédictibilité recherché, c'est-à-dire du potentiel d'interpolation-extrapolation rendu possible par la collecte des données (choix des caractéristiques et de leur échantillonnage). On doit reconnaître ici trois situations selon la connaissance initiale de la cause (prise au sens large, c'est-à-dire décomposable éventuellement en causes) et selon que cette prédictibilité est simplement souhaitée ou est un impératif.

1) Prédictibilité pour avertissement. Les observatoires, jouant le rôle d'avertisseur, enregistrent nécessairement des changements des systèmes biophysicochimiques parmi lesquels interviennent des changements à rythme cosmique (nyctéméraux, annuels), mais aussi "aléatoires" (climatiques) c'est-à-dire erratiques et difficiles à expliquer de façon prévisible dans le cadre étudié, enfin des changements graduels qui peuvent s'observer sur le long terme et être d'origine humaine ou non. Seuls ces derniers changements justifient l'utilisation d'avertissements ; ce fait suppose une aptitude à reconnaître, au sein des multiples changements observés, ceux qui permettent de prédire une tendance durable et profonde d'origine anthropique et d'en éviter éventuellement les effets indésirés.

L'intérêt des observatoires est de prévenir, dans un système diffus et complexe, donc mal identifié, les évolutions préoccupantes des systèmes écologiques dès le début de leur développement et non pas de constater passivement celles-ci très *a posteriori* <<11 est tentant d'envisager, comme dans le cas des outils sophistiqués créés par le développement technologique, de doter la "machine-écosystème" d'un tableau de bord pourvu de clignotants indicateurs de bon fonctionnement ou détectant au contraire les signes avant-coureurs de perte de rendement du système ou... de la panne définitive>> (LEFEUVKE, 1983).

La sélection optimisée de caractéristiques et sites d'études est possible dans le Processus Répétitif d'Accroissement des Connaissances par comparaison typologique à divers niveaux de perception (écologie discriminante). Un tel tableau de bord est réalisable par surveillance itérative (acquisition, BDR, études multivariées). Il reste présentement à mettre en oeuvre, de sorte que ce type de prédiction est encore présenté comme "le dilemme de l'écologue" (SJOÏS, 1979). Ceci est aujourd'hui inexact et l'on sait même, à partir d'une connaissance de la couverture d'une zone en surveillance on peut localiser le point optimal où une étude plus intensive permettra de mieux comprendre la signification des changements (et si nécessaire les points complémentaires d'étude, p. 380). Ceci n'implique pas une modélisation morphofonctionnelle complète de tout le système sélectionné, une telle étude n'ayant

jamais été réalisée de façon cohérente jusqu'à présent, mais ceci nécessite une présélection des caractéristiques indicatrices retenues. Ce sont celles qui ont la sensibilité la meilleure ou/et celles qui, comme composants majeurs, ont une fonctionnalité dominante dans le système écologique observé (en terme de musse x débit). Des recherches d'écologie générale devraient par ailleurs porter sur la signification des caractéristiques retenues et décrites en Systèmes-Experts.

2) Prédictibilité d'effets sur causes actuelles. Lorsque les causes sont connues, les relations fonctionnelles caractéristiques-causes/caractéristiques-effets ne sont pas nécessairement connues mais simplement décrites par coïncidence. L'intérêt d'une prédictibilité est surtout de connaître dans quelle mesure un effet globalement apprécié se répétera dans l'espace et le temps sous l'effet de causes semblables. La diversité des conditions d'application de cette cause (coupe forestière "à blanc", pâturage...) sur des effecteurs toujours quelque peu différents, fragilise ces prédictibilités.

Nous avons vu au paragraphe 6.4.4. que nous disposons dorénavant d'outils performants pour assurer de telles extrapolations-interpolations temporospatiales c'est-à-dire pour asseoir, moyennant un minimum de moyens (moyens optimisés), le degré d'extrapolation-interpolation possible. Dans ce domaine particulièrement, l'accès à des BDR, du type ECORDRE (p. 321), devrait permettre à terme un gain considérable pour définir, par étapes successives, Les points d'intrapolation d'identité de plus en plus proximale, donc de risque d'extrapolation de plus en plus réduit.

De même, l'usage des classifications hiérarchiques (p. 374) étayera la stratégie des essais complémentaires nécessaires pour un contrôle des risques pris dans ces extrapolations (en les transformant en interpolations entre essais nouveaux couvrant un domaine dont les caractéristiques sont choisies comme peu hétérogènes). Il est ensuite possible de procéder par hétérogénéité croissante. Ainsi les relations causes-effets, dérivant par exemple des essais de pesticides ou d'engrais, incluant les effets dits "non intentionnels", telles la dégradation physique des sols ou l'acidification des forêts, pourraient être généralisées sur une base objective.

3) Prédiction d'effets engendrés par des causes futures. Le fait de pouvoir actuellement constater des relations causes-effets, malgré l'imperfection des relations ainsi établies par carence d'étude systémique, constitue une propriété prédictive qui devrait être beaucoup mieux exploitée pour des prédictions par analogie.

Par exemple, l'introduction sur le marché d'un nouveau produit chimique conduira à des actes sur les systèmes écologiques dont les conséquences dépendront 1) de son mode d'application sur ces systèmes (apports par les fumées d'incinération d'ordures, ou pulvérisation en émulsion sur une culture, vidange dans un cours d'eau, etc), 2) des modalités locales d'action de ces actes dans ces systèmes, c'est-à-dire de leur nature physique (climat, type de sol, ...), chimique (anaérobiose, acidité, ...) et biologique (forêt, pisciculture, ...).

Saisir l'occasion d'étude sur des actes identifiés permet, par analogie (p. 484), une prédictibilité sur l'application de futures techniques quant à leurs risques et résultats intentionnels (sur la base d'effets antérieurs).

La mise en place de méthodes rigoureuses de constats servira donc en outre à la prédiction sur les effets d'actes futurs ; cela peut être vrai pour des actes décidés banalement, tel l'impact d'une future autoroute qui pourrait être précisé par les constats sur anciennes autoroutes, telle l'introduction de nouvelles molécules (p. 480) qui pourrait être simulée sur des molécules aux propriétés ou/et modalités d'usage voisines, telles les analogies entre accidents industriels (nucléaires, chimiques) ou biologiques (introduction intempestive d'organismes envahisseurs comme modèle biotechnologique, ...).

8.4.4. Domaines d'application des constats

Les constats écologiques peuvent être effectués à des échelles temporospatiales très variables, depuis les constats par observations satellitaires permettant, par exemple, d'enregistrer l'évolution des surfaces arides (désertiques) ou les déforestations planétaires, ou l'évolution de la production de céréales, jusqu'aux études au niveau des placettes expérimentales ou des lichens d'une branche d'arbre.

Remarquons que ces divers événements s'inscrivent dans le champ écologique et que les changements d'échelles y sont facilités par sa structure permettant la gestion des données à toutes échelles (p. 39, 294). Ceci est important car les impacts de(s) cause(s) se situent à des échelles très variées, pour une même cause.

Par exemple, certains auteurs, constatant l'augmentation du CO₂ atmosphérique, craignent un effet de serre entraînant de sérieux déséquilibres planétaires par accroissement de la température globale (p. 115). Indépendamment un constate localement dans les terrains labourés intensifiés une diminution de la matière organique du sol par oxydation, ce qui a, parmi les nombreuses conséquences, pour effets de libérer 65 300 m³ de gaz carbonique pur par hectare pour chaque pour cent de carbone perdu par la couche arable... Ces 6,5 m d'épaisseur de gaz pur pour chaque pour cent de carbone endogé, amplifiés par l'extension des surfaces cultivées, contribuent certainement (avec les rejets industriels et urbains) à l'enrichissement planétaire en CO₂.

Comme on le voit sur cet exemple, les changements d'échelle peuvent être assez aisés grâce à l'approche morphofonctionnelle ; surfaces cultivées, perte moyenne du carbone des sols, ... sont des paramètres accessibles et facilement interpolables sur les surfaces terrestres émergées.

Les difficultés d'interprétation de la signification des constats limite le domaine de leurs applications. Ces difficultés sont très nombreuses mais ont au moins trois origines :

- 1) l'absence de données,
- 2) l'indisponibilité des données,
- 3) la fragilité des hypothèses choisies en raison de l'absence d'études fondamentales.

Dans l'exemple ci-dessus, les prévisions relatives aux conséquences de la future augmentation du CO₂ atmosphérique sont incertaines mais fort inquiétantes ; car l'augmentation de CO₂ atmosphérique est bien observée. Identifier les causes et agir sur celles-ci a l'avantage de lever l'incertitude ; il faut acquérir l'information précise.

Actuellement, on peut considérablement réduire, voire théoriquement annuler les conséquences du point 2) par les BDR exhaustivement développées ; les BDR, connectées si nécessaire par télématique, rendent disponibles toutes les données antérieures. On peut également envisager de rendre beaucoup plus explicites et confrontables les propositions choisies par les experts (pour l'exemple traité, voir la discussion sur les incertitudes par TRABALKA *et al.*, 1986) dans des Bases de Connaissances, pour réduire les difficultés du point 3) et optimiser les acquisitions de données tendant à réduire le point 1).

8.4.5. Sélection des caractéristiques de constats

1. Introduction

La sélection des caractéristiques retenues pour effectuer un constat écologique dépend évidemment des objectifs décrits ci-dessus. On ne donne pas la même priorité aux diverses caractéristiques selon l'échelle, la prédictibilité et la motivation de l'étude.

- 1) Options pour caractériser l'état des systèmes. Il s'agit essentiellement, en caractérisant globalement l'état des systèmes, de les évaluer relativement les uns aux autres ou de noter leurs modifications selon deux grands types de comparaison :

1 a) leur modification structurelle, c'est-à-dire la modification des compartiments et cinèses du système lui-même,
1b) leur modification insidieuse, c'est-à-dire sans modification structurelle importante, un changement insidieux, tel que celui des charges contaminantes circulant dans ces systèmes.

Dans le premier cas, l'état du système lui-même indique le changement, dans le second cas des études plus fines détectent des modifications de composition des systèmes (surtout pollutions) sans changement fondamental de structure.

Cette sélection de caractéristiques sur l'état des systèmes vise surtout à la surveillance écologique (p. 492), voire à la prédictibilité par système d'avertissement (p. 493).

2) Options finalisées de caractéristiques. Dans ce cas, soit les caractéristiques peuvent être classées à partir d'effets attendus, soit être ordonnées en raison de la mise en oeuvre d'actes bien identifiés engendrant des hypothèses quant à leurs effets, soit être choisies à la suite d'études préalables.

Nous allons considérer successivement ces deux modes de choix de caractéristiques.

2. Options sur l'état des systèmes

2a) Les modifications structurelles des systèmes écologiques doivent être constatées par comparaison synchronique ou/et diachronique qui nécessiterait normalement une approche globale. Cette comparaison a toutefois, jusqu'à présent, été pratiquée à partir de points de vue spécialisés par défaut d'outils de synthèse.

Des raisons de disponibilité ou d'économie peuvent évidemment orienter la sélection des caractéristiques.

Un très grand nombre de possibilités ont été évoquées, notamment le vaste domaine des bio-indicateurs qui pourraient s'avérer efficaces. Il n'est en effet pas rare de voir recommander par quelques spécialistes des organismes qu'ils jugent comme sensibles, comme bio-indicateurs "pertinents". Cette pertinence devra être vérifiée cas par cas : de très nombreux bio-indicateurs ont été proposés à partir d'approches spécialisées qui, dès l'origine, n'ont pas confronté la valeur bio-indicatrice par rapport aux autres caractéristiques potentiellement concurrentes.

Pour le diagnostic des systèmes écologiques, une importante réflexion a été conduite sur les bio-indicateurs avec l'espoir d'utiliser les organismes comme caractéristiques pertinentes de constats << Caractériser l'état des systèmes écologiques, détecter les agressions, prévoir, surveiller, contrecarrer les transformations indésirables, tout cela exige des moyens de diagnostic efficaces et fiables.

On a mis beaucoup d'espoir dans l'utilisation des indicateurs biologiques : en effet, qui, a priori, pourrait mieux rendre compte de l'état et des transformations du vivant que le vivant lui-même ? >> (BLANDIN, 1986). Mais celle-ci conduit au constat < <Le terme de BIOEVALUATION commence à être utilisé pour désigner l'ensemble des procédures à fondements biologiques qui peuvent servir à l'établissement de diagnostics écologiques. A l'heure actuelle, on est encore loin de disposer d'un corpus de méthodes solidement établies. >> (BLANDIN, 1986).

Un tel constat n'est pas étonnant : il résulte de l'approche exclusivement écobioologique de tels diagnostics (chap. III) inadéquate aux systèmes écologiques (chap. II). L'évaluation des systèmes écologiques, même focalisés dans un objectif de protection ou développement biologique (bio-évaluation), ne peut se faire à partir des informations biologiques systématiquement discontinues (p. 201). Seule la prise en compte des caractéristiques biophysicochimiques permet une appréciation des traits les plus informatifs sur ces systèmes, ceux-ci n'étant pas nécessairement biologiques.

L'étroite intrication des variables physiques, biologiques et chimiques a été omise par biocentrisme ce qui interdit d'échantillonner les caractéristiques pertinentes des systèmes écologiques. L'approche interdisciplinaire présentée au paragraphe

6.4.4. révèle que toute caractéristique écologique peut être sélectionnée objectivement : un choix pertinent est réalisable si celui-ci n'est pas effectué *a priori*.

Toutefois les constats écologiques devront porter sur un nombre de caractéristiques suffisant pour permettre un suivi des modifications, c'est-à-dire des traitements multifactoriels des systèmes écologiques en cause. Ceci implique une étude préliminaire de données pré-existantes ou/et de données spécialement acquises appréciées pour la valeur informative et leur redondance dans les systèmes. L'optimisation pouvant être effectuée selon les méthodes décrites au paragraphe 6.4.

Ceci peut être particulièrement important lorsque l'on veut à la fois multiplier les points de surveillance (telle la signature des images spectrales de télédétection) et à la fois une approche des systèmes écologiques. Elle est notamment un moyen général de percevoir les conséquences globales d'actions techniques par des études multivariées. Il ne s'agit à ce stade que d'une optimisation du choix des caractéristiques pertinentes "éco-indicatrices" décrivant les systèmes et susceptibles d'être les "clignotants du tableau de bord" de LEEUEVUE (1983) (p. 493).

L'élaboration d'une telle sélection de caractéristiques produit des matrices riches, échantillonnées spatiotemporellement dans les systèmes écologiques sans *a priori* (biocentriques ou non) et conduit ainsi à mettre en évidence l'importance informative relative des caractéristiques sur ces systèmes. Beaucoup d'organismes transitoires, vicariants seront éliminés en raison de leur faible poids dans la structure même des systèmes ; il s'agirait, là de clignotants instables qui s'opposent à une nécessaire fiabilité. Une telle approche évite l'obligation de <<**La normalisation qui se traduit par un choix de critères dans un cadre théorique déterminé**>> (BLANDIN, 1986) : la quantité d'information disponible sur les systèmes est seule prise en compte, sans choix abstrait de critères. Il n'y a aucune raison de réduire *a priori* l'étude des écosystèmes aux seuls indices biotiques. Toutefois, ceci ne retire pas l'intérêt des organismes en raison de leurs connexités étroites et primitives avec leurs milieux (p. 90).

2b) Les modifications insidieuses

Au lieu d'attendre une modification structurelle suffisamment prégnante pour avoir une valeur informative décelable, donc d'attendre une modification relativement profonde, on peut chercher à présélectionner des indicateurs sensibles aux changements insidieux, essentiellement dus à des pollutions inconnues ou connues (causes intentionnelles ou accidentelles). Dans ce cas, les composants "fragiles" ou/et "actifs" sont particulièrement indiqués. Dans un écosystème certains composants biologiques (tronc, graines,) ou non (stock humique, chéromasse, ...) sont très stables et peu sensibles aux changements : ils sont les éléments stabilisateurs. A l'inverse, la partie biologiquement active des écosystèmes est, par ses cinèses, relativement sensibles aux changements et des effets apparemment "dilués" agiront sur ces compartiments "exposés".

Notons que ces compartiments "exposés aux changements" le sont pour tout changement, y compris les aléas mésologiques erratiques normaux, ce qui écarte les indicateurs trop sensibles des clignotants informatifs du tableau de bord écosystémique évoqué ci-dessus. On peut toutefois les utiliser de deux façons a) pour les bio-essais, b) pour la biosurveillance.

a) Les bio-essais utilisent des organismes choisis pour leur sensibilité aux agents (chimiques) du milieu entraînant leur létalité, souvent à doses bien inférieures à celle révélée par les analyses chimiques usuelles (LEBRUN, 1980). Presque toujours ces essais s'effectuent à partir d'éléments écosystémiques (sol, eau, air) au laboratoire en microcosmes mais certains peuvent être mis en oeuvre *in situ*, tel que le classique test de survie des truitelles pratiqué dans les eaux courantes libres ou canalisées. Une analyse critique et détaillée des bio-essais est présentée par BLANDIN (1986).

b) La biosurveillance. Autant l'effet létal ou les modifications physiologiques observées sur des organismes sensibles sont à la base des bio-essais, autant la biosurveillance de la contamination s'appuie sur des organismes apparemment insensibles aux modifications chimiques de leur milieu.

C'est leur aptitude à assimiler puis incorporer des éléments dans leur organisme puis à les dégrader ou les excréter en atteignant, une concentration-point-dequilibre (= biocontamination) qui est utilisée ici. La concentration d'un élément quelconque dans un organisme est une caractéristique per se (comparaisons spatiotemporelles des bioconcentrations de la même écophase de la même espèce).

Elle peut en outre, et avec une extrême prudence, être comparée à d'autres concentrations des composants du milieu de cet organisme. Ces rapports, si fréquents dans la littérature, sont appelés bio-accumulation (parfois biomagnification). La concentration n'est pas exprimée par rapport au milieu, même intestinal, mais, comme toujours en chimie, par rapport au compartiment analysé. La bioaccumulation (= rapport de concentrations entre compartiments) n'a rien à voir avec la concentration : rapport de l'élément au compartiment. Le rapport de bioaccumulation est non seulement complexe, mais surtout la métrique d'expression des résultats dans deux composants différents est différente. Il s'agit à chaque mesure d'une concentration, c'est-à-dire de la quantité d'une substance X rapportée au compartiment analysé Y. Les compartiments systémiques ayant une structure morphofonctionnelle et pondérale usuellement fort différente d'un compartiment Y_1 à l'autre Y_2 , les comparaisons de concentrations varient autant en raison de ces différences de structure que de la quantité de la substance (BOUCHE, 1984b).

De ce point de vue, les rapports entre deux concentrations tel le rapport IXq/IXl^8 ou encore $IX]^D/[X]$ exprime d'abord un artefact dans la "chaîne" des concentrations $[X]$ dans le sol (s) —*■ lombricien (1) —► bécasse (b).

Les processus d'assimilation, métabolisme, émanation (p. 82) règlent la bioconcentration d'équilibre quelles que soient les modalités très variables entre espèces. En fait, le lien ne peut être, pour l'organisme en cause, qu'avec la partie du milieu en échange cinétique (connexion systémique).

Cette bioconcentration traduit *per se* un état de transit fonctionnel des éléments corporels étudiés dans les organismes-compartiments de référence. Ceci permet par comparaison d'organismes identiques (même écophase de la même espèce) de comparer une biocirculation relative et notamment l'évolution de pollutions diverses dans des milieux comparés à partir des mêmes écophases/espèces.

Cette propriété de la biosurveillance est essentielle car elle permet souvent, en conditions d'analyse standardisée (extraction, pesée, dosages, expression des résultats), de détecter des micropolluants très inquiétants qui circulent effectivement dans les chaînes trophiques, et notamment les carcinogènes et pesticides, ... généralement lipophiles et indécélables dans les phases abiotiques solides ou liquides, notamment dans des sols à composition trop variable.

Quant aux bio-accumulations (positives ou négatives) entre organismes et milieu ou entre organismes en "chaîne trophique", la plus grande prudence s'impose car la nature des compartiments comparés n'est en général pas identique : dans un sol, la concentration d'un élément ne dépend pas de sa biodisponibilité, ni de son adsorption sur les minéraux, ni de sa concentration effective dans le milieu mais du lest minéral mis dans la balance comme constitutif du compartiment dosé. De même, dans l'eau, pour les lipophiles ce n'est pas la concentration des lipides véhiculant la substance mais le lest hydrophile qui sert de référence. Entre organismes les concentrations rapportées à la "biomasse" dépendent avant tout du squelette structural de l'organisme. Une expression par rapport à la nucléomasse corrigerait et expliquerait avec plus de pertinence bien des "bio-accumulations" (p. 86) ; ces dernières devraient être également interprétées en tenant compte des transits abiotiques entre métabolons, même biolytiques (p. 223). Ainsi, les mesures dans les lombriciens apparaissent comme particulièrement adéquates (BOUCHE, 1984b) mais ne donnent que des informations sur leur point d'étude. Une intégration spatiale plus vaste peut être obtenue, par exemple avec des rapaces (VENANT *et al.*, 1984).

3. Options finalisées

A partir de causes ou d'objectifs précis on peut conduire une sélection de caractéristiques et de modalités d'observations particulières en hiérarchisant les effets globaux et plus spécifiques, attendus des constats.

Dans certaines études, des caractéristiques-effets, pas nécessairement déterminantes, seront obligatoirement retenues en raison de leur valeur pour une appréciation économique. Par exemple, dans un essai de traitement contre un nuisible d'une culture, les effets du traitement sur ce nuisible et sur la culture seront décrits en détail même s'il ne s'agit ni de l'effet le plus important ni le plus informatif vis-à-vis du système. Les deux approches "conséquences écologiques de la technique" et "conséquences économiques" motivent des choix de caractéristiques différentes. Toutefois, leur interprétation sera en étude multifactorielle conjointe, les données étant tantôt traitées en données actives, tantôt en variables supplémentaires.

Si elle est abordée objectivement et écologiquement, la focalisation économique n'est en définitive, qu'un guide imposant, en plus des modalités de surveillance des modifications structurelles et insidieuses (p. 497), une spécificité, par exemple dans la sélection des substances chimiques étudiées en biosurveillance. De même, la prise en compte sociale des risques de cancer peut conduire à une focalisation sur certaines bioconcentrations, par exemple parmi les fongicides cancérigènes couramment utilisés 98 % des risques découlent de 12 molécules sur les 28 étudiées (BOUGUERRA, 1987).

Toutefois, le plus grand risque des études, à partir d'options finalisées, résulte présentement du fait que les sub-disciplines institutionnalisées, concourant de façon parcellisée à l'écologie et ayant du fait de leur pointillisme induit des actes aux effets mal constatés, reproduisent leurs occultations dans le choix des méthodes et caractéristiques. Une réévaluation écologique s'impose à cet égard : on ne peut partir du seul point de vue des spécialistes de la discipline ayant engendré un problème.

8.4.6. Approfondissement des constats

Constater un changement dans des systèmes écologiques ne renseigne pas sur les mécanismes morphofonctionnels liant la cause aux effets. C'est actuellement souvent à la suite de constats plus ou moins empiriques voire, faute de prévisions, à la suite de difficultés persistantes, que des études finalisées des systèmes écologiques sont entreprises. Des recherches plus approfondies, en général coûteuses, devront donc porter sur les systèmes écologiques eux-mêmes. Parmi ceux qui ont fait l'objet de constats écologiques, il faut alors choisir les plus pertinents. Outre les raisons de commodité qui peuvent jouer, ce choix peut être optimisé en tenant compte de l'ensemble des systèmes écologiques observés (p. 378).

Les difficultés techniques résultent généralement de la carence d'une approche systémique suffisante. Que ce soit la dégradation des sols et leur érosion, la pollution par des agents dangereux, la remontée du niveau de CO₂ terrestre, ... invariablement sont en cause les conséquences de nos activités découlant d'approches trop séquentielles et non intégrées au champ écologique.

La réciproque est vraie ; ces difficultés révèlent la nécessité d'approches intégrées. Mais après la mise en évidence des problèmes, la plupart des recherches finalisées n'atteignent que graduellement, et bien après le début des difficultés, une efficacité convenable. Cela provient du fait que l'approche spécialisée est souvent très privilégiée pour résoudre le problème classiquement lié à une discipline alors que c'est la spécialisation qui est en fait à l'origine de la difficulté.

Il semble en effet logique pour un problème de produit chimique ou de physique du sol... de faire respectivement appel à un chimiste ou à un physicien du sol. Il n'en est rien : ces spécialités sont indispensables, mais leurs contributions doivent être replacées dans le contexte du champ écologique. Il faut changer de perspectives par l'écologie discriminante (p. 422) d'une part, et concilier l'approche empirique et les techniques raisonnées aux divers niveaux d'observations, d'autre part (p. 472). Ici les critères de scientificité seuls ne suffisent pas : il faut une démarche scientifique et écologique.

8.5. Applications en fonction de niveaux de perception

8.5.1. Usages des syntégrons et subécosystèmes

I. Symbioses

Les mécanismes symbiotiques sont relativement les mieux connus car ils ne font appel pour leur étude essentiellement qu'à des disciplines biologiques préexistantes et ne portent en général que sur deux organismes (p. 228). Leur mise en oeuvre pratique est usuellement associée à celle des végétaux à symbiotes. Les symbiotes sont :

1) des bactéries : tels les Rhizobiums associés aux légumineuses et permettant une fixation d'azote atmosphérique à partir d'énergie fournie par la plante,

2) des champignons : telles les mycorhizes associées de façon très généralisée avec les plantes au niveau du système racinaire. Elles accroissent considérablement les capacités d'absorption des plantes, notamment en phosphore (BOWEN *et al.*, 1975, p. 126).

L'usage pratique des symbiotes peut se faire par inoculation systématique des plantes (graines, plantules) par des souches microbiennes efficaces ou par l'apport de sols ou mixtures contenant les symbiotes. Elle implique la connaissance des relations de l'ensemble symbiotique avec son milieu.

2. Coopérations

Plus récemment la découverte de sols "suppressifs", c'est-à-dire de l'apport de sols en quantité minime permettant de limiter ou de supprimer des maladies végétales, a permis de mettre en évidence l'importance d'organismes, associés à la rhizosphère, contribuant, dans le cadre d'un équilibre physicochimique d'environnement adéquat à une association défensive des végétaux contre certains pathogènes.

Des espoirs sont placés dans l'inoculation systématique des plantes par ces germes. La connaissance des relations de tout ce système, et pas seulement des composants biologiques, s'impose.

3. Antagonismes

Il s'agit de l'emploi d'agents biologiques contre les ennemis des cultures en jouant sur des antagonismes, voire sur des "pièges". Cette technique prônée depuis longtemps à un franc succès, lorsqu'un système simple s'y prête, en utilisant des germes, nématodes ou insectes contre certains ennemis des cultures.

De véritables préparations biologiques vivantes (trichogrammes) ou stabilisées (virus) peuvent ainsi être utilisées lorsque la réintroduction permanente de l'agent de lutte est nécessaire. Par ailleurs, certains succès remarquables ont été obtenus lors d'invasion de nuisibles introduits accidentellement dans des pays où ils ne préexistaient pas et où ils étaient pratiquement initialement dépourvus d'ennemis spécifiques. Ces nuisibles deviennent alors des fléaux. L'introduction volontaire d'ennemis spécifiques a permis d'atteindre parfois de remarquables succès dans ce type de lutte biologique.

4. Lutte intégrée

Dans une double perspective de réduire les effets néfastes (en faits incontrôlés, p. 482) de certains pesticides et leur coût, et de concilier les pratiques de lutte biologique - présentement limitées, par les carences de la systémique, à de simples couples hôte-ennemi - la lutte intégrée est prônée. Celle-ci fait l'objet de nombreux travaux dont la pratique implique actuellement une approche empirique pragmatique de différentes actions choisies à partir du connu (très restreint) ; il s'agit de choisir les

moyens de prévention et lutte en minimisant risques et coût. L'empirisme, parfois relativement efficace, supplée actuellement à la connaissance des mécanismes conduisant aux effets des actes dans les agrosystèmes les intégrant. La lutte biologique s'appuie présentement sur une "intégration" informelle de connaissances spécialisées (p. 490). La double approche de l'explication en Système-Expert et de la recherche d'une connaissance objective des agrosystèmes, aujourd'hui réalisable, devrait fonder une agronomie intégrée aux agroécosystèmes où la lutte (préventive surtout) serait une partie de l'ensemble des pratiques mises en oeuvre : choix des cultivars ou races, pratiques culturales, aménagements, fertilisation, agent biologique ou chimique de lutte, ... Alors seulement la lutte sera effectivement intégrée.

5. Subécosystème sol

Comme résidus de cultures, de mauvaises herbes, d'émanation algale ou muscinale, de produits racinaires et exsudats divers, de fèces d'herbivores... la nécromasse végétale constitue à la fois un stock d'éléments biogènes indisponible directement pour les végétaux et une source d'énergie diffuse. L'apport de ces éléments au sol est continu, avec un fort rythme saisonnier. Les mécanismes macro-microbiologiques et chimiques intervenant au niveau des divers métabolons et transits sont décrits présentement de façon essentiellement morcelée (fixation N, ammonification microbienne, ammonification animale, nitrification, dénitrification, par exemple pour le cycle N) sans que l'on puisse intégrer la qualité de ces échanges spatiotemporels, ce qui est essentiel. En effet, la rupture de l'harmonie de ces échanges est probablement à l'origine de très nombreux problèmes environnementaux et agronomiques.

Il est clair que la recherche en ce domaine est encore très peu développée. Elle permettrait un usage plus rationnel des propriétés de la rhizosphère (évoqué ci-dessus), des possibilités offertes pour biostimuler les sols par l'introduction de lombriciens (cette pratique, déjà importante en Nouvelle-Zélande, est l'un des moyens de valoriser les landes, prairies pauvres de montagne, sols à restaurer, en association avec d'autres techniques, tel le sursemis ou le semis direct, le non-labour, la fertilisation, ...). De même, la connaissance effective de la permanente reconstitution spontanée des agrégats organo-minéraux dans le sous-système sol devrait jouer un grand rôle dans l'appréciation des propriétés physiques, hydrodynamiques et biologiques de ceux-ci (Lai, 1987, GRANVAL et BOUCHE, en prép., p. 478) et permettrait une prise en compte en "agronomie intégrée". Enfin la connaissance des mécanismes permettrait de comprendre comment utiliser, de façon cohérente avec le fonctionnement du sol, les moyens dont nous disposons (engrais, travaux du sol, herbicides, ...) et d'éviter l'emploi de pesticides (notamment fongicides) conduisant à la perte des propriétés pédologiques souhaitées (p. 480, 503).

8.5.2. Connaissances des écosystèmes et usages des parcelles

La connaissance effective des écosystèmes locaux (holocénose) est malheureusement très imparfaite. Dans ce domaine, il semble que la prairie permanente pourrait jouer un rôle central dans la compréhension des mécanismes susceptibles d'application, tant en agriculture qu'en foresterie, car il existe un continuum technique entre celle-ci et les cultures les plus intensifiées, voire confinées, et parmi les systèmes permanents entre cette prairie et les systèmes forestiers, notamment par l'agroforesterie et les systèmes herbacés/ arborés (en général) (fig. 8-2, p. 504).

1. Ixis prairies

L'homme est responsable de la plupart des systèmes prairiaux qu'il entretient par son cheptel et diverses techniques annexes (écobuage, fauche, ...). Ces systèmes offrent l'avantage technique et expérimental d'être non brisés ou désorganisés en permanence par une succession d'actes saccadés, comme dans les cultures intensives

mais d'être des systèmes écologiques qui, dans les prairies permanentes, atteignent à l'équilibre métastable où les actes sont une variable s'intégrant aux systèmes.

Les holocénoses prairiales ont la complexité normale des écosystèmes ; elles associent de nombreuses espèces végétales (couramment 40 angiospermes), une microflore diversifiée, une faune notamment du sol et d'herbivores non domestiques et, pour les pâtures, les animaux domestiques. Ces éléments sont temporospatialement organisés (faciès et touffes végétales, drilosphère, rhizosphère, cycles végétatifs et d'exploitation, ...). Ces systèmes sont usuellement largement autarciques, comme le dégageaient, dès 1963, les premiers bilans fort hypothétiques de MACFADYEN.

Les recherches conduites depuis n'ont pas levé la plus importante inconnue : l'estimation effective de l'émanation énergétique du tapis végétal qui est le moteur de tout le système. L'estimation des tissus aériens émanés (litière, et ingesta d'herbivores) est souvent très fruste ; par exemple, cette cinèse est confondue avec des différences d'états de la biomasse végétale aérienne ce qui conduit à des estimations grossièrement erronées (GOUNOT et Yu, 1980). L'approche morphogénétique permettrait des estimations plus rigoureuses sur ce domaine fort sous-estimé (Yü et al., 1975).

Quant aux émanations sous forme d'exsudats libérés ou échangés avec des symbiotes (mycorhizes, *rhizobium*.) ou des organismes (pucerons, nématodes) au cours de l'élaboration souterraine (desquamation racinaire, mort de poils absorbants et de racines, prélèvements de rhizophages) leur importance reste tout à fait hypothétique.

Le fait que ces systèmes soient complexes et intégrés mais "multidisciplinaires" explique que très peu d'études morphofonctionnelles soient conduites dans de tels systèmes. Nous possédons de nombreuses descriptions de l'état de la végétation sous l'action humaine, mais pratiquement aucune quantification fiable de son fonctionnement en terme de cinèses.

C'est pourquoi l'effort de recherche sur ce domaine a été conduit de façon pluridisciplinaire dans diverses approches du Programme Biologique International. Les recherches méthodiques, visant à documenter de multiples modèles partiels et tendant à s'intégrer dans un diagramme général ont été entreprises, notamment par le groupe CASIMIR qui a pu quantifier ou estimer de nombreux aspects du système prairial (pour les plantes : structure végétale, photosynthèse, morphogénèse, écophysiologie, translocation d'assimilats et pour le devenir des émanats végétaux et la dégradation de ceux-ci, leur usage par le rôle lombricien et certains germes du cycle de l'azote) (CASIMIR, 1982).

D'autres études ont amélioré notre connaissance sur des aspects complémentaires, telles les relations herbe-herbivores (AKIYAMA et al., 1984).

Les études pastorales du tapis végétal, des apports d'engrais, de charges de bétail, de digestibilité potentielle des végétaux existent. Les techniques de régénération du tapis herbacé ont été développées. Le système herbacé peut atteindre des rendements très contrastés entre des parcours des zones subdésertiques, à charge animale très faible, et les prairies normandes intensifiées (tel Le Vieux Pin où 2,3 UGB sont atteintes) (LAISSUS, 1985). Les approches pratiques empiriques ont donné, en certaines circonstances, des résultats très encourageants ; mais faute d'une intégration réelle celles-ci ont généralement pour défaut une extrapolabilité limitée, certains mécanismes étant ignorés ou mal compris (en terme de recyclage d'éléments, de portance des sols, de tassement, d'infiltrabilité, de capacité en eau, d'enracinement, ...).

L'étude du sous-système herbacé, et particulièrement du saprolytisme sous fouflage et herbivores - avec une attention particulière aux intégrations et stabilité - permettrait probablement d'augmenter considérablement l'efficacité de ces systèmes où les techniques de "grandes cultures" ont souvent été appliquées, en raison de leur disponibilité, de façon aveugle... et ont souvent échoué.

Toutefois, la prairie permanente se prête à des manipulations d'intensification, y compris de renouvellement du tapis herbacé, sans bousculer les pédostructures. Ceci

permet de tester dans des conditions systémiques normales de nombreuses agrotechniques. Elle permet d'étudier, dans un contexte économique concret presque chaque agrotechnique isolément (labour, herbicide, introduction lombricienne, drainage, formes d'engrais, mode de semis, mode de récolte, charge de bétail, etc.) par rapport à un témoin non perturbé.

La **figure 8-2**, au verso, présente très schématiquement les relations entre systèmes écologiques spontanés et unités "totalement" contrôlées. Au système "spontané", à faibles intrants et extrants mais à grande intégration de multiples relations mises en place peu à peu par co-évolution diffuse, sont opposées les unités de production artificialisées parcellisant pour optimisation un compartiment (une plante, un porc, une bactérie manipulée ou non) totalement dépendant des intrants (= coût) contrôlés par l'homme et assurant uniquement des extrants (un produit et des déchets divers). La plupart des systèmes sont intermédiaires. Les systèmes spontanés conduisent à une diversité de produits simultanément (produits du bois, de l'élevage, de la cueillette, de la chasse, de la pêche et des loisirs) avec intrants et extrants quantitativement limités. Les systèmes confinés, ou quasi contrôlés, conduisent efficacement à un produit standardisé au prix d'intrants nombreux et d'extrants souvent indésirables (polluants par excès local ou contaminants biocides).

Tout l'art serait, connaissant les systèmes écologiques, de les utiliser pour minimiser les intrants (= coût), maximiser les extrants souhaités et limiter les sorties nocives en utilisant un maximum de propriétés spontanées (= autarciques des systèmes subspontanés). Au contraire, tous les conflits résultent d'applications d'intrants (contrôle volontaire ou pollution incidente) sur des systèmes inconnus et de ce fait déréglés (p. 477,490).

Opérationnellement, la prairie semble donc offrir une base d'essai où la systémique s'appliquerait au mieux et permettrait une estimation effective de l'impact de diverses techniques pratiquées en agriculture, agroforesterie, foresterie et une interpolation entre prairies sur sols et climats très variés. Son rôle opérationnel pour une approche agronomique fondamentale objective semble stratégiquement central, les "prairies" allant des savanes sur brûlis forestiers subéquatoriaux aux "herbages" à lichens des rennes de Laponie. Par ailleurs, les holocénoses prairiales se prêtent au niveau local à des études d'interdépendance mutuelle à la fois au plan de la fourniture d'herbe vis-à-vis d'un troupeau mobile et des interactions socio-économiques (Bal ent, 1987) ; cet aspect met enjeu des écorces (p. 509).

2. Les sols cultivés

Un clivage intellectuel et méthodologique s'est institué vis-à-vis des sols cultivés : c'est le royaume du monofactoriel, du coup par coup, de l'étude parcellisée. Des cultures intensives mettent en oeuvre une variété sélectionnée, sur un support sol recevant des doses d'engrais précis,.... des traitements pesticides simplifiant le système par élimination des mauvaises herbes et de tout insecte (ne sont visés que les ravageurs mais tous en souffrent), et de tout champignon aérien (ici aussi seuls les phytoparasites sont ciblés mais les autres germes sont touchés : tels les entomophores).

Ici la méthodologie mise en oeuvre vise à la "maîtrise" des facteurs de production en nombre limité par une simplification du système. C'est l'approche simplissime, longtemps seule possible à partir d'études monofactorielles et bien adaptée au morcellement des disciplines. Son succès est évident en apparence, mais la succession des actes révèle que nombre d'entre eux ne sont que la correction à court terme (dans une saison culturale), des conséquences négatives des actes immédiatement antérieurs.

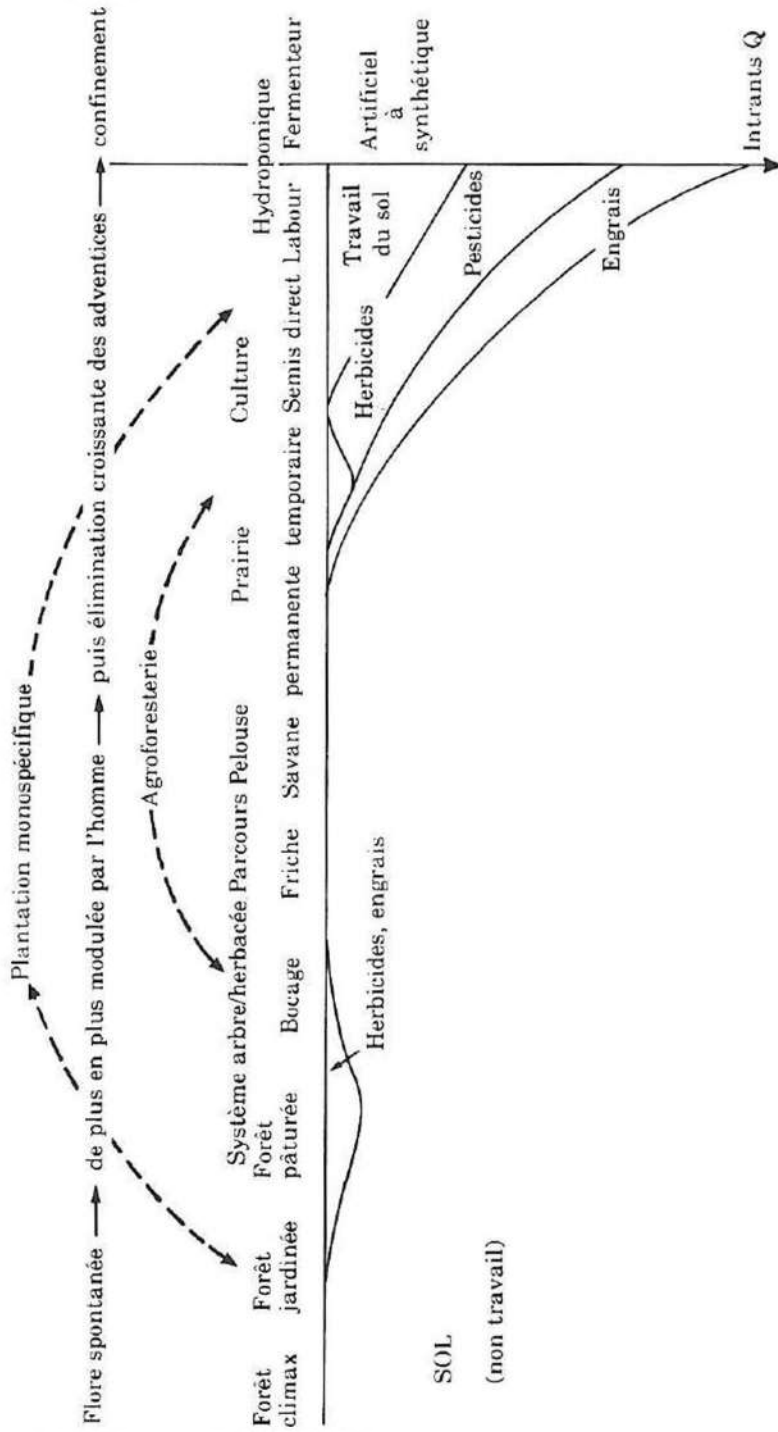


Figure 8-2 - Du climax au contrôle total. Les systèmes climax ne nécessitent pas d'intrants mais permettent seulement la chasse-cueillette, (récolte) : ils sont peu productifs pour l'homme car non "faits" pour et par lui. L'artificialisation croissante favorise au prix d'actes croissants une récolte croissante... mais ceci n'est pas proportionnel, car l'usage intelligent de systèmes spontanés permet, en les guidant, une production plus efficace que par leur démolition.

Le succès n'est souvent qu'apparent.

- 1) Partout où l'échec est patent, les cultures ont disparu créant en terme d'espace agricole des zones marginales.
- 2) Le coût social et énergétique de cette approche est dans bien des cas très problématique (ELIHMCH, 1977).
- 3) Même où l'apparence est satisfaisante, des difficultés importantes perdurent (érosion, maladies, coût, stabilité des sols, ...) et peuvent à terme constituer une limite.
- 4) L'importance des aides financières témoigne d'un bilan économique artificiel.
- 5) Cette filière dépend, par ses très nombreux intrants d'industries en amont.
- 6) Les conséquences des intrants dans les systèmes écologiques ne sont pas globalement appréciées (PIMENTÉL, 1980 ; RAMADE, 1987), leurs coûts environnementaux, donc sociaux, non plus.

En zones cultivées, la tendance a été à la "simplification" des systèmes de sorte que les mécanismes spontanés réglant les compétitions végétales et animales sont rarement utilisés, quoiqu'ils soient largement décrits au niveau des principes dans de nombreux ouvrages agronomiques, ou/et d'écologie biologique. Des cultures traditionnelles (par exemple, haricot/maïs) fonctionnaient sur ce principe. De même les assolements tendaient à corriger l'uniformité spatiale végétale par une hétérogénéité temporelle. Enfin, le rôle positif des "mauvaises herbes" semble ne pas avoir fait l'objet d'une étude intégrée où leur influence sur la qualité biophysicochimique des sols et la richesse biocénotique (y compris le maintien d'un cortège d'antinuissibles) serait étudié dans des conditions de métastabilité adéquate. Si les adventices sont des concurrentes partielles des cultures, pour l'eau et la lumière, elles restituent (en nécromasse) graduellement les nutriments "empruntés" au système et jouent un rôle d'engrais vert intercalaire, permettant le travail microbiologique du sol. Les plantes messicoles exploitent, par leur géométrie foliaire complémentaire à celle des céréales, l'énergie lumineuse de façon en fait peu compétitrice et assureraient ainsi un accroissement de la bioénergétique du système. Elles permettent par leur propre cortège de phytophages divers la nourriture de prédateurs qui amélioreraient la protection de la culture.

Des systèmes réels pourraient être optimisés, comme celui d'usage optimal de l'énergie lumineuse incidente par les céréales + algues + plantes messicoles +/- cultures dérobées ou +/- engrais verts, accroissant :

- a) le bio-travail du sol, intégration organique et cycle élémentaire,
- b) le cortège des prédateurs et parasites polyphages, c'est-à-dire l'équilibre phytosanitaire et nutritionnel.

Ces systèmes spontanés mériteraient sûrement une étude approfondie avant d'être éventuellement simplifiés.

Des contraintes économiques, résultant de l'approche parcellisée appliquée prioritairement et séquentiellement à la sélection variétale, aux apports d'engrais, aux travaux aratoires et au machinisme, ont présentement obligé à une "simplification". Cette simplification des agrotechniques plaquées sur un milieu complexe (sol, climat, faune, flore et microorganismes adventices), considéré comme une "boîte noire", entraîne des réactions spectaculaires (pullulation de ravageurs, érosion, ...) nécessitant en retour de nouvelles actions... une accumulation de coûts et surcoûts en résulte. Cette simplification va à l'encontre de toute coproduction, comme celle des produits de la chasse. Si techniquement l'inertie des acquis jouera encore longtemps, cette simplification n'a plus raison d'être aujourd'hui : l'étude intégrée d'agro-écosystème est maintenant possible (chap. Vil).

En tout état de cause, une évolution des techniques vers la réduction des intrants (subsidés) est probablement indispensable, et sera induite, si on veut maintenir les revenus dans des systèmes agricoles aux produits contingentés : le développement des techniques correctement conduites (en tenant compte du système-sol au complet !) comme le semis direct, la lutte intégrée, les engrais bioefficaces...

nécessite une connaissance fondamentale qui pourrait s'établir en partant de systèmes écologiques descriptibles (prairie permanente) avec une intensification graduelle (prairie artificielle, semis direct de céréales, cultures intensives classiques) et par une écologie discriminante incluant l'approche systémique. L'approche systémique, aujourd'hui possible (chap. Vil), et les contraintes économiques devraient pousser à cette ré-évaluation des agrotechniques (p. 517). Celle-ci est possible méthodiquement en décrivant chacun des actes des itinéraires techniques (*sensu* SEBILLOTTE, 1978) pour ce qu'ils sont : action mécanique, apports, récolte (prélèvements), etc. Ils s'agit ici de bien dissocier les actes (p. 96), agissant sur les écosystèmes, des motivations de ceux-ci, analysables par ailleurs au plan socio-économique.

3. La forêt

La forêt joue au moins trois rôles plus ou moins exclusifs ou complémentaires selon les cas :

- rôle productif : essentiellement de bois,
- rôle récréatif y compris chasse et pêche,
- rôle environnemental de maintien des sols, de revégétalisation de zones dénudées ou désertifiées, de tampon hydrodynamique.

Le partage de l'espace réserve à la forêt les zones critiques, dans des contextes de sol ou/et de climat difficiles. La rentabilité par unité de surface rend l'usage de nombreuses agropatiques peu ou pas envisageables de sorte que c'est essentiellement la gestion des essences et de leur croissance qui constitue la technique essentielle en foresterie.

Du point de vue productiviste, l'utilisation massive de conifères constitue un moyen d'accroître sensiblement la productivité (en terme quantitatif) de bois alors que certains feuillus (chênes, hêtres, ...) de croissance plus lente ont un usage différent et complémentaire.

Au plan récréatif, la diversité semble un facteur important souvent lié à la fertilité permettant de supporter une population élevée d'herbivores, saprophages et carnivores, dette fertilité semblant surtout assurée par des caducifoliés ou des clairières herbacées ; elle permet les coproductions (champignons, chasse, ...).

Au plan environnemental, la fonction pionnière des conifères est précieuse mais leur fragilité au feu limite leur usage.

Les connaissances fondamentales sur les systèmes forestiers sont relativement établies pour la partie aérienne de ces systèmes (REICHLE, 1970 ; Ellenberg, 1971 ; GALOUX, 1983). Implantés en général dans des zones difficiles, les forêts sont très dépendantes du sol qui en retour est très dépendant de l'aménagement forestier.

Dans le cas d'apports d'essences localement allogènes, les pratiques forestières pourraient être utilement complétées par l'apport d'éléments constitutifs majeurs de leurs écosystèmes. Le "problème" des conifères dont la litière se minéralise mal est particulièrement critique à la fois en zone nordique, montagneuse et en zone de plantations "hors-climax". Ils entraînent une régression du subécosystème sol de l'état de mull à celui de mor, de système à dynamique rapide (fertile) à un système à dynamique endogée pauvre accompagnée d'une baisse (et d'un niveau faible) d'activité. Les conséquences sur la qualité des sols (acidification, déstructuration) et sur la vie des invertébrés (HUHTA *et al.*, 1986) et des vertébrés (réduction de nourriture pour carnivores et poissons) sont également négatives. Ces inconvénients étant aggravés par les pluies acides, plus particulièrement dans les zones septentrionales, où ce phénomène est bien étudié.

La recherche de substituts aux résineux (ou aux *Eucalyptus* qui sous d'autres latitudes posent des problèmes semble-t-il similaires) ou de moyens corrigeant les écosystèmes à résineux est donc souhaitable.

La connaissance intime des systèmes forestiers créés est la condition de leur usage optimal. Par exemple, toujours sous résineux, la mauvaise minéralisation acidifiante liée à la litière inflammable n'est pas la règle absolue. Ses exceptions (sol à mulls actifs sous Pin Laricio en forêt d'Aitone, Corse) ouvrent à des possibilités de choix alternatifs de boisement et surtout à l'apport de compléments fonctionnels lors des plantations (mycorhizes, lombnciens efficaces, mélange boisé, ...).

Dans ces systèmes l'approche du subécosystème aérien seul est relativement limitée ; presque tous les progrès à attendre viennent de l'analyse du subécosystème "sol". A cet égard, le dépérissement des forêts, dont l'extension va croissante, présente un excellent thème où les approches analytiques évoquent tour à tour une cause explicative (BONNEAU, 1985) et illustrent les limites des approches spécialisées. L'approche multivariée et effectivement intégrée pourrait constituer le moyen d'obtenir les réponses causables à une situation symptomatique : le dépérissement.

4. Systèmes multi-usages

Des cultures ou élevages en systèmes boisés (= agroforesterie) sont très développées et constituent des systèmes complexes. Ces holocénoses en mosaïques, ou en réseaux (bocages), constituent des domaines où par excellence l'analyse-synthèse écologique constitue la seule approche cohérente possible pour fondamentalement comprendre leur fonctionnement. De la même manière, de nombreux systèmes herbes/ligneux existent et constituent des ensembles ne relevant ni du pastoralisme ni de la foresterie simplificatrice intensive (fig. 8 2, p. 504). Ces systèmes sont intégrés étroitement "dans la parcelle". Mais le multi-usage peut aussi s'étudier pour ses régulations (sensibilité au feu réduite par les herbivores par exemple ou par le boisement en bandes, en haies, etc.) et par la diversité des produits ; il n'y a pas que la simple récolte à prendre en compte mais aussi certains prélèvements (pêche, chasse, loisir) qui sont sources de revenus proportionnellement de plus en plus conséquents dans les sociétés occidentales.

5. Autres usages de l'espace

Dans le présent paragraphe les portions d'espace ont été perçues à partir de leur affectation socio-économique et des actes agro-sylvo-pastoraux qui en découlent. D'autres affectations existent. Telle une autoroute que l'on peut regarder comme une portion d'espace ayant reçu des opérations d'aménagement et dans laquelle des actes d'entretien et de trafic (émissions gazeuses des automobiles par exemple) se développent. Si ce type de système est notoirement plutôt abiotique (bien que non totalement) il s'inscrit dans les écornes et l'écosphère, comme une parcelle linéaire liée par ses échanges colatéraux aux interactions parcellaires.

Le même propos pourrait être tenu pour une usine, un élevage de porcs hors sol, un immeuble, une excavation minière, qui ne sont pas des systèmes fermés mais des portions d'espace qui spatiotemporellement échangent des éléments descriptible dans une systémique standard. A l'intérieur de ces systèmes, hors le cas très particulier de l'homme et de son cortège de commensaux et parasites, l'écosystémique (au sens des organismes dans leur environnement) a des apports techniques restreints mais non nuis car le contrôle des processus industriels et urbains est largement sujet aux régulations anthropiques et s'affranchit fortement des systèmes écologiques (p. 27).

Ces systèmes confinés, à contrôle interne largement anthropique, ne sont que des sous-systèmes qui à l'échelle des écornes (régionaux) dépendent, pour leur évaluation "externe", de l'écosystémique classique ; ils jouent, comme toute parcelle, un rôle de sous-système dans les écornes où ils s'inscrivent aux confins de leur confinement.

Une certaine logomachie a poussé certains sociologues à annexer par grossières analogies les relations systémiques urbaines à la terminologie écologique dans une "écologie urbaine" qui n'a à peu près rien à voir avec l'écologie (c/*. LEBRETON, 1987).

11 ne suffit pas d'avoir affaire à un système complexe pour le considérer comme écologique sinon deviennent "écologiques" les ordinateurs.

8.5.3. Ecorne et modifications régionales

1. Régions et écorne

La connaissance des écosystèmes au niveau du mode d'exploitation d'une holocénose ou, si l'on parle en terme cadastral, de la valorisation économique des parcelles, illustrée au paragraphe précédent, ne saurait suffire car chaque "parcelle" n'est ni écologiquement, ni économiquement, ni socialement une entité fonctionnelle isolée. Elle s'inscrit, dans une écosystémique plus générale, celle des écorne et dans des systèmes socio-économiques régionaux. Il faut entendre ici avec beaucoup de souplesse le concept de "région" (tout comme celui d'écorne allant du pieu à l'écosphère, p. 194). Cela peut être un ensemble restreint de parcelles agronomiques constituant l'entité économique d'une ferme faisant vivre pour partie ou totalement une ou quelques familles ; cela peut être la portion d'espace où des groupes effectuent les transhumances pastorales (telle une région de migration de bédouins), cela peut correspondre à des états, ou groupes d'états concernés par des aménagements majeurs (vallée du Nil et barrage d'Assouan, par exemple), ou encore soumis à des règles socio-économiques locales (chaque états) ou internationales non planétaires (CEE, USA).

Nous réserverons au paragraphe 8.5.4. quelques illustrations planétaires (écosphériques) et aborderons donc ici les échanges écologiques entre holocénoses, à l'échelle "régionale", surtout pour montrer la complexité de ceux-ci à la fois dans la documentation (gestion des données et connaissances, chap. V, et dans la nécessité d'une approche écosystémique décloisonnée utilisant toutes les connaissances au-delà des seules considérations spécialisées, chap. VII).

Ici encore il est indispensable que l'écologue remplisse son rôle et nécessaire de rappeler que ce rôle ne peut être qu'une contribution à l'appréciation et valorisation de nos actes (p. 468). Cette contribution, devant être remise dans son contexte socio-économique pour toute considération politique, échappe au domaine de l'écologue *stricto sensu*.

Si les deux concepts d'écorne et de région sont ici superposables c'est qu'ils se situent "entre" deux entités définies (holocénose/écosphère ou parcelle/globe) avec une infinie nuance de complexités d'organisations et d'échanges entre les écosystèmes élémentaires (= unités économiques élémentaires).

Dans ce paragraphe, les actes effectués dans chaque parcelle sont appréciés par leurs conséquences sur les parcelles adjacentes. Dans ce domaine d'amplitude élastique, mais parfaitement étudiable par écologie discriminante face à une problématique socio-économique précise, l'homme agit par des décisions elles-mêmes très variées - allant de la gestion d'une usine ou d'une ferme par un entrepreneur aux choix politico-économiques modulant les activités humaines (p. 472). La compréhension des conséquences écologiques résultant de ces actes est loin d'être quelconque notamment pour une utilisation-gestion optimale des espaces dans le cadre de politiques diverses (stratégies d'entreprise, aménagement de l'espace, politique de régulation de marchés agricoles ou de planification socialiste, ...).

La connaissance de ces systèmes permettrait, comme déjà indiqué (p. 485), une prévisibilité des conséquences à tous les niveaux de décisions. Il suffit de constater présentement, au niveau de la CEE, la cacophonie déclenchée par les décisions économiques visant à limiter la production agricole pour voir l'absence de moyens pour fonder les décisions sur une approche rationnelle.

Il y a évidente difficulté de substituer à une monoculture intensive économiquement subsidiée, un usage anthropique raisonné de l'espace (cynégétique, touristique, récréatif, halieutique, agro-extensif, voire forestier) en raison de l'absence de connaissances systémiques permettant de confronter aux faits gérés sur Bases de Connaissances les opinions d'experts relatives aux richesses en aménités,

importantes avec l'augmentation des loisirs, et aux coproductions. Il existe peu d'études d'écologie à cet égard mais le peu existant devrait être disponible opérationnellement, ce qui n'est pratiquement pas le cas, pour les raisons développées au paragraphe 5.2.

Ce sous-chapitre illustre, sur des cas particuliers, la nécessité d'une approche authentiquement écologique (scientifique) de l'appréciation des actes humains dans les écorces. Nous l'observerons à deux échelles d'espace nécessairement arbitraires : L'une que nous appelons locale (entre parcelles ou à l'intérieur d'une petite région) et l'autre nationale (à l'échelle de nations européennes dans et entre elles ou d'une fédération importante, USA, URSS, ...).

2. Modifications et transferts locaux

L'espace peut être généralement partagé pour des exploitations qui socio-économiquement ont des motivations fort distinctes. Cela peut être fait par la délimitation de parcelles ou de cultures irriguées ne pouvant être broutées par des troupeaux conduits par des groupes humains transhumants. Cela peut être l'attribution d'une parcelle à une exploitation intensive en céréales avec de très nombreux intrants (actes sur l'agroécosystème) à l'échelle de la placette ou l'usage de cette parcelle en prairie fourragère et pastorale (p. 501) jouxtant une forêt productrice de grumes ou/et de loisirs. Cette attribution de l'espace varie profondément en fonction des tenants (propriétaires, ...), des règles socio-économiques jouant au présent (constitution d'un revenu pour les acteurs) et du poids du passé (jouant systématiquement la fonction d'inné, p. 96) c'est-à-dire de l'état juste antérieur.

Ces divers éléments se modifient eux-mêmes dans l'espace, d'une situation locale à l'autre, écologiquement (par exemple en raison de la topographie, de l'hydrodynamique ou des propriétés des sols, des cycles saisonniers entraînant des périodes d'abondance ou de désertisation : ex. le Sahel), économiquement (par l'intégration de moins en moins autarcique de l'exploitation fermière européenne, par l'ouverture d'un marché transnational, voire mondial) et historiquement.

L'étude locale montre à la fois la complexité écologique et socio-économique des interactions intervenant à l'échelle d'écorces. Par exemple, en s'en tenant au seul pastoralisme, la gestion de l'information et l'analyse systémique peuvent localement être conduites sur divers niveaux (SALENT, 1987), celui de la parcelle (holocénose) et ceux des écorces relatifs aux circuits de paturage/jour, de l'exploitation/année et du Lerritoire/pluriannuelle <<... nous avons tenté de proposer une définition du système pastoral qui rende compte des interactions entre les systèmes biologiques, techniques et humains, mais aussi de celles en jeu à l'intérieur de chacun de ces trois systèmes et ce, aux différents niveaux d'organisation que l'on peut repérer. Cette définition est fondée sur les principes de base de l'écologie : les herbivores conditionnent la structure, le fonctionnement et l'évolution des communautés végétales. La végétation conditionne le comportement alimentaire et le niveau d'alimentation des animaux. Sous des conditions pédoclimatiques données, l'ensemble de ces interactions constitue l'écosystème pâturé. Mais cet écosystème est piloté par l'homme à différents niveaux d'échelle d'espace et de temps. La cellule de base constituée par les interactions herbe-animal et ses niveaux de pilotage (l'écosystème pâturé piloté) constituent le système pastoral.

Dans le système ainsi défini, nous proposons de distinguer trois niveaux principaux d'organisation : BERGER-HERBIVORE-VEGETATION (niveau du circuit de paturage et de la journée) ; ELEVEUR-TROUPEAU-SOLE PATUREE de l'exploitation (niveau de l'ensemble des surfaces pâturées par le troupeau au cours d'une saison ou de l'année ; c'est là que se juge la qualité de l'ajustement entre les besoins des animaux et l'offre en herbe dans le cadre du système d'élevage) ; SOCIETE PASTORALE-TROUPEAUX-TERRITOIRE PASTORAL (niveau de la gestion globale du territoire pâturé par l'ensemble des troupeaux des éleveurs sur un pas de temps pluriannuel). Ce dernier niveau s'inscrit dans le système agricole > > (BALENT, 1987) (fig. 8-3).

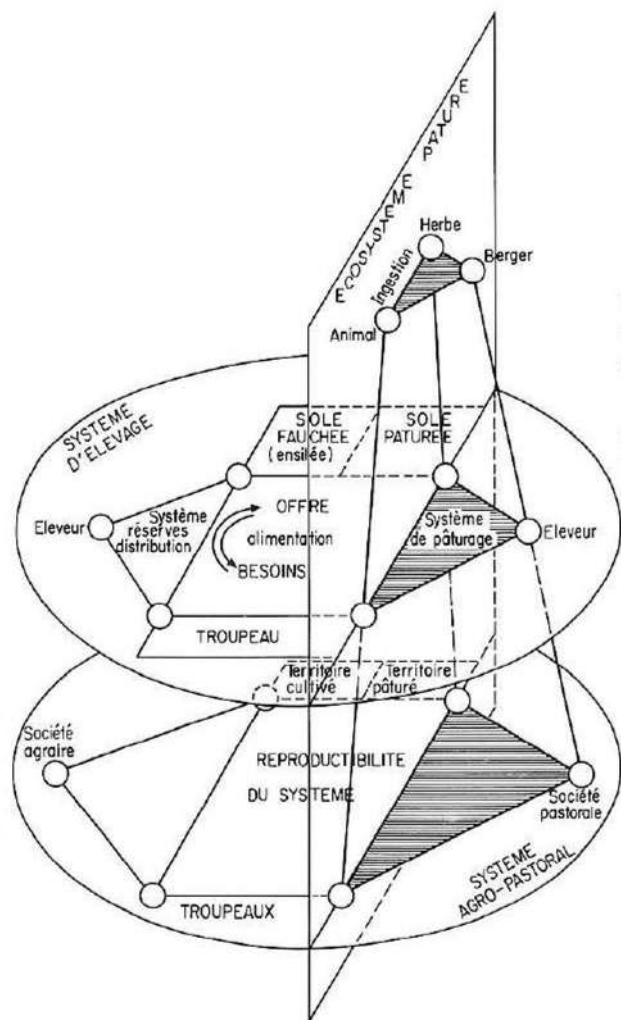


Figure 8-3 - Niveaux d'organisation du système pastoral et son articulation avec les différents niveaux d'organisation (société, exploitation) pris en compte dans l'étude des activités d'élevage (d'après BALENT, 1987).

Chaque holocène évolue parfois brutalement par un changement d'affectation socio-économique, telle la tendance forte à la réduction des surfaces affectées à l'agriculture intensive dans la CEE (observée et pronostiquée en France, Tir et al., 1987), c'est-à-dire à une "déprise" agricole de l'espace. L'arrêt d'une activité économique sur une portion d'espace peut entraîner le développement d'un système écologique sans actes intentionnels (friches). A l'inverse, d'immenses régions de la planète, sous la pression des transferts socio-économiques et de la démographie humaine, subissent le processus inverse (défrichage, déforestation, mise en culture de zones pastorales). D'où la planification fréquente, mais nécessairement partielle, d'un aménagement "rationnel" de l'espace où l'écologie devrait apporter sa contribution.

Si les systèmes économiques ne sont pas clos, les systèmes écologiques ne le sont pas non plus, de sorte que l'accumulation de connaissances tant fondamentales qu'appliquées (chap. V, VII) en une intégration systémique réelle et concrète ne peut qu'améliorer la mesure des conséquences donc la rationalité de nos actes.

11 est possible, pour de telles études, d'effectuer une présentation agro-écosystémique des diverses parcelles d'espace à partir de l'étude intensive de certains points de celles-ci. Nous disposons depuis peu des outils permettant une sélection optimale des placettes (p. 380) - à la limite extrême de la placette constituant le(s) système(s) le(s) plus représentatif(s) d'une région. Paule d'une écologie discriminante suffisamment développée jusqu'à présent, cette approche logique a été suppléée par le choix empirique de placettes à partir de divers critères pratiques et subjectifs - c'est notamment le cas de l'approche d'études comparatives de 43 placettes sélectionnées sur des critères agronomiques puis environnementaux dans le Marais Poitevin (BOUCHE *et al.*, 1988) permettant l'approche comparative d'holocénoses soumises à des gestions de l'espace contrastées (gestion de l'excès d'eau en marais mouillés ou en marais asséchés : mise en cultures diverses, prairies, voire friches).

Mais la simple juxtaposition des connaissances relatives à des parcelles, même si elle devait par des processus d'interpolations logiques (p. 346, 443) couvrir l'ensemble du territoire, ne saurait suffire pour une règle systémique évidente : l'approche locale porte sur un système local où les placettes (parcelles) ne sont que des composants : la somme des parties ne résume pas les propriétés du tout (p. 94).

Nous prendrons ici deux exemples, l'un phytosanitaire et l'autre cynégétique, à partir de deux approches biologiquement spécialisées (sur un insecte et un gibier) puis un exemple plus complexe qui pourrait faire l'objet d'études multivariées.

L'un des nuisibles agricoles le plus spectaculairement ravageur est le hanneton, insecte coléoptère Scarabaeidae *Melolontha melolontha* L. dont les larves ("les vers blancs") se développent dans le sol en consommant des racines, y compris celles des plantes cultivées (betteraves, laitues, plantes prairiales) au point d'anéantir, au moins localement, des cultures. Cet insecte après métamorphose change radicalement de mode de vie et l'adulte va consommer les feuilles d'arbres caducifoliés très divers. Autrefois, synchroniquement, tous les 3 ans, des vols massifs d'adultes, quittaient les surfaces herbacées (cultures, prairies) pour venir défolier, parfois quasi totalement, les arbres et y copuler avant que les femelles retournent pondre dans les surfaces herbacées, assurant ainsi la nouvelle génération. L'existence d'un territoire partagé entre formations herbacées et arborées est indispensable à un tel cycle et le choix d'une organisation du paysage de *ce type est* favorable à cet insecte qui fut (et est encore ça et là) un problème économique non négligeable.

Les transferts peuvent concerner, pour un même élément, des échelles locales, régionales ou transnationales. Ainsi par exemple, la bécasse des bois, *Seolopax rusticola*, l'un des petits gibiers les plus prisés par les gastronomes, est étroitement dépendante de sa nourriture presque exclusive : les lombriciens.

Or la disponibilité de cette nourriture n'est pas semblable en fonction de la gestion des parcelles. Oes parcelles offrent en outre un abri plus ou moins protecteur à cet oiseau qui, selon un rythme nycthémeral d'activité, exploite et occupe des parcelles différentes dans un paysage structuré (souvent nutrition nocturne en prairies et abri diurne dans les bois) (GRANVAL, 1988).

En outre, les variations climatiques saisonnières limitent la disponibilité des proies : celles-ci deviennent inaccessibles en hiver dans la plus grande partie de l'Europe (enneigement, gelée, inactivité, *cf.* le modèle d'activité lombricienne, p. 208) et cet oiseau migre vers les zones à climat doux, océanique ou méditerranéen. A l'inverse, en été, c'est un vaste territoire septentrional et oriental où l'humidité estivale permet l'activité lombricienne qui accueille cet oiseau migrateur, tandis que cette activité lombricienne devient nulle en climat méditerranéen et aléatoire en climat océanique sud-européen du fait de la sécheresse. La bécasse effectue alors une double migration soit régionale, altimétrique, vers les reliefs frais et arrosés, soit transnationale vers les pays d'Europe septentrionale. 11 y a ou bien migration altitudinale ou bien latitudinale pour faire coïncider ce prédateur avec les zones de disponibilité de la proie (BOUCHE *et al.*, en prép.).

Remarquons que dans ces deux exemples "réductionnistes" - en fait ceux de spécialistes connaissant les relations d'un organisme avec les holocénoses qu'il exploite alternativement - seule l'approche locale voire transnationale (Bécasse) permet d'expliquer l'abondance, forte ou faible, et l'état sanitaire des populations (nous reviendrons sur la bécasse et son état radioactif, brièvement à l'alinéa suivant).

Ces exemples peuvent conduire à des recommandations techniques fort dissemblables (renforcer le maillage parcelles ouvertes riches en lombriciens/arboré pour la bécasse ; supprimer les bosquets en zones herbacées ou cultivées pour éradiquer le hanneton). Prises isolément ces propositions socio-économiques sont contradictoires.

Mais en fait, ce simple échange arborés/herbacés est infiniment plus complexe. C'est précisément l'incapacité d'intégrer cette complexité qui a conduit à des propositions techniques qui, suivies d'applications systématiques, ont induit des situations socio-économiquement préoccupantes.

A cet égard, en France, les opérations de remembrement des exploitations agricoles, conduites pour des raisons socio-économiques évidentes (résultant de l'évolution des techniques agricoles, des marchés, des transports...), ont été effectuées parcelle par parcelle, à partir d'une appréciation essentiellement agro-économique. Ceci négligeait le système où elles s'inscrivaient tant au point de vue écologique (échange des matière-énergie, dont les organismes entre parcelles : lutte biologique naturelle des polyphages, érosion, microclimat) qu'économique. D'autres richesses - en passe aujourd'hui d'être déterminantes pour les ruraux, tel le tourisme (paysage, richesse cynégétique et halieutique), ayant été totalement négligées.

Ainsi le système bocager (parcelles délimitées par des haies) ayant perdu sa valeur économique "apparente" pour les haies (traditionnellement exploitées par les ruraux en usages multiples : fourrage, bois de chauffe, bois d'oeuvre, ...) fut-il arasé. Le constat des premiers dommages devait conduire à une prise en compte tardive de l'intérêt de ces haies par une recherche exemplaire, par l'effort de concertation des divers spécialistes intervenant dans celle-ci et dont un bilan temporaire a été présenté par LEFEUVRE (1981).

L'intérêt historique, sentimental et esthétique donc économique des haies, réside aussi techniquement dans le maintien d'un système structuré complexe ayant des effets climatiques, apidologiques, anti-érosifs (hydrodynamiques), biocénotiques et cynégétiques (l'halieutique semble avoir été négligé) complexes mais dont nombre d'analystes soulignent le rôle agro-économique globalement positif.

L'absence d'une véritable systémique, écologique (alors techniquement impossible de toute façon) interdit en ce domaine une conclusion péremptoire... mais cette réserve devrait également s'appliquer à la décision d'araser le bocage, qui, elle, a été radicale.

Seule l'étude écologique intégrant les traits majeurs de ces systèmes - utilisant les acquis, tous les acquis (y compris ceux pré-établis) - permettrait de réduire les risques de ces décisions d'aménagements locaux... qui apparaissent quelque peu dérisoires socio-économiquement malgré leur coût (TIREL, 1987).

A cette échelle, comme à toute autre, l'approche systémique réellement intégrée ne peut combler les méconnaissances mais, par un bilan sérieux et explicite des connaissances, on peut proposer de premières interprétations, dont un bilan des méconnaissances. Ceci devrait par nécessité conduire à des études objectives complémentaires permettant au décideur, dans un contexte donné, de prendre des décisions n'allant pas à l'encontre des objectifs socio-économiques assignés.

3. Modifications et transferts nationaux

Les transferts à cette échelle sont considérables et relèvent de mécanismes nombreux dont les principaux sont ceux liés aux mouvements des fluides. Les apports d'eau en zones essentiellement arides ou subarides sont spectaculaires par leurs effets dans des régions, ainsi totalement fertilisées, comme la Mésopotamie et l'Egypte. A ces mouvements de grande ampleur peuvent être associés des bouleversements écologiques (Barrage d'Assouan, pollutions accidentelles réitérées des fleuves européens, ...). Les transferts aériens sont également caractéristiques de processus transnationaux en Europe, telles les pluies acides induites en Europe moyenne et touchant fortement l'Europe septentrionale. De la même façon, les migrations de très nombreux animaux (notamment oiseaux et criquets migrateurs) sont transnationales et la gestion tant du niveau que de la qualité des populations en cause dépend de nombreuses actions humaines. Par exemple, la bécasse dépend largement des divers territoires où elle hiverne (p. 511) et des nombreuses zones septentrionales, d'altitude ou/et humides où elle se reproduit (ou est chassée) ; son état sanitaire dépend des zones traversées comme en témoigne sa forte radioactivité après l'accident de Tchernobyl, une importante partie de la population hivernant en France estivant dans les zones septentrion-orientales de l'Europe.

Ces exemples montrent qu'aucune coupure nette n'existe entre holocénose et écome d'une part, et écome et écosphère d'autre part, comme nous allons le voir.

8.5.4. Ecosphère et activités anthropiques

Après avoir envisagé les interactions humaines à l'échelon de mécanismes des subécosystèmes, holocénoses et écornes, nous illustrerons ici brièvement les changements à l'échelle du globe terrestre, celle de l'écosphère. Notons qu'il n'y a aucune discontinuité entre ces divers niveaux (p. 292) et que les informations acquises sont essentiellement des interpolations entre études ponctuelles par rapport aux échelles Lemporospatiales (p. 423) en cause. Cette remarque pour indiquer que le système le plus global n'est que l'intégration des sous-systèmes (chap. VII).

Mais l'observation à l'échelle globale est doublement intégrée au niveau atmosphérique notamment où la fluidité gazeuse tend (mais tend seulement) à uniformiser les effets de toutes nos actions locales agissant sur les écosystèmes locaux : le bilan des échanges de carbone d'une forêt, ou d'une portion d'océan se "dilue" au gré des vents, ce qui ne signifie pas que cette homogénéisation soit parfaite, l'exemple des pluies acides issues de pollutions atmosphériques généralement méridionales par rapport à leurs précipitations illustre ces mouvements préférentiels.

Les mouvements au niveau terrestre (p. 119) ne sauraient être réduits à ceux des vents, les divers courants hydriques épicontinentaux et marins jouent également un rôle important dans le brassage des éléments et les échanges thermiques (p. 154).

Bar ailleurs nous disposons de plus en plus d'informations satellitaires, c'est-à-dire d'enregistrements des spectres d'émission du globe couvert dans certains domaines de longueurs d'onde et selon certains itinéraires observés avec une focalisation (cotes des prélèvements : picsels) variable en fonction des satellites.

Cette dernière information, théoriquement la plus propre aux études globales nécessite toutefois une interprétation judicieuse, les diverses ondes résultant de réflexions et émissions superficielles se superposant et seule la résultante extra-terrestre étant perçue par les sondes spatiales.

Ce puissant outil d'intégration et de mesure a donc des limitations sérieuses qui ne sont levées que si l'on connaît les mécanismes sous-jacents expliquant les propriétés des émissions et réflexions spectrales terrestres... ce qui est loin d'être le cas pour les processus écologiques, leur étude au sol ou dans la troposphère étant généralement conduite sans relations avec ce moyen intégrateur.

Par exemple, rappelons l'amoncellement de données analytiques relatives au carbone organique des sols, mesurées surtout à des fins agronomiques mais présentement indisponibles, faute d'une gestion en BDR, alors que le niveau de CO₂ atmosphérique est inquiétant et que cette variable intervient dans l'appréciation des causes du changement terrestre de la concentration atmosphérique de ce gaz.

L'importance des multiples actions locales de l'homme est considérable, comme le remarque BOLIN (1982) ; elles interviennent de façon sensible dans l'équilibre métastable terrestre. Par exemple, l'homme brûle (minéralisé) annuellement sous forme de carbone d'origine fossile 10 % de la fixation estimée des plantes. Il fixe par combustion et production d'engrais environ 50 % de la fixation annuelle d'azote.

Encore ces bilans ne tiennent pas compte des effets induits ; par exemple, la libération de COg dans l'atmosphère n'est pas accrue par la modeste combustion du moteur du tracteur mais par l'oxydation par le labour des tonnes de carbone (environ 70 tonnes/ha) des sols arables. Cette oxydation est d'ailleurs amplifiée par les apports d'engrais azotés stimulant la microflore minéralisatrice.

On voit que les bilans globaux peuvent directement intégrer des données mondiales (satellitaires, de consommation de pétrole, etc.) mais doivent aussi après interpolations temporospatiales se fonder sur la connaissance de mécanismes locaux, même très précis : les causes réelles de l'accroissement de CO₂ résultent de déséquilibres locaux entre minéralisation et organisation/carbonatation de celui-ci (p. 495). Réciproquement, l'appréciation de l'impact de nos actes doit être faite à toute échelle où ceux-ci ont des conséquences.

11 y a toutefois une résultante globale de l'évolution des écosystèmes au niveau de l'écosphère où l'impact de l'homme est loin d'être négligeable. Il est connu depuis longtemps que cet impact ne saurait pas plus être dissocié au niveau des subécosystèmes (p. 500) que des parcelles (p. 501) et que des études régionales (p. 508) ne serait-ce qu'en raison des traceurs "involontaires" de l'activité anthropique que constituent les molécules artificielles, telles le DDT.

Ici encore l'approche par l'intelligence Artificielle et l'écologie discriminante (incluant la modélisation) peuvent seule permettre l'intégration de données susceptibles de relier les observations à l'échelle du globe avec leurs origines diverses et particulières.

8.6. Perspectives et applicabilité

8.6.1. Introduction

Comme indiqué en introduction de ce chapitre relatif aux applications écologiques (p. 468), il y a à la fois une demande sociale considérable pour une écologie concrètement opérationnelle, un fiasco de mise en oeuvre de nombreuses propositions sectorielles et, en l'état actuel, des difficultés restreignant les modalités d'applications (p. 472) d'une écologie discriminante (p. 477) qui reste largement à élaborer concrètement de façon opérationnelle (2ème partie).

En attendant nous sommes réduits, par une approche passive de constats (p. 490), à enregistrer une évolution très préoccupante de l'écosphère à tous les niveaux d'observation. Cette évolution résulte de la mise en oeuvre, en aveugle dans des écosystèmes inconnus, d'actes décidés sur la base d'une approche réduite au micro-économique et à quelques connaissances sectorielles.

Cette situation n'est pas sans effets sur la recherche fondamentale et par rétroaction sur la rationalité des applications. Pour les sciences exactes en général, l'existence même d'applications partiellement rationnelles (extraction minière, mécanisation agricole, stations d'épuration, ...) engendre des recherches techniques d'autant plus intenses qu'une motivation économiquement viable est créée par les premiers succès, que des connaissances sont ainsi acquises, des emplois de spécialistes créés... et formés par un enseignement éduquant ces spécialistes.

Cette spirale ascendante du jeu appliqué-fondamental-enseigné a un rôle stimulant... mais orienté vers les domaines où la fiabilité technique (donc scientifique et économique) est assurée et, par voie de conséquences, délaisse des zones d'ombres d'autant plus épaisses qu'elles sont empiriques, trop complexes et/ou non opérationnelles.

Cette tendance, spontanée et micro-économiquement justifiée, est pernicieuse car elle privilégie toujours plus des domaines qui apparaissent lors d'une approche intégrée en hypertrophie relative avec d'autres. Cette approche intégrée permet de faire des bilans moins biaisés (par exemple sur le nombre des techniciens et chercheurs initialement attachés à chaque discipline sectorielle.... ce nombre pouvant être nul pour des secteurs délaissés mais importants vis-à-vis de notre écosphère.

Il y a une grave distorsion des connaissances : la somme de savoirs sectoriels ne garantit ni l'intégralité, ni l'homogénéité, ni la cohérence de notre savoir sur notre milieu.

L'homme agit sur son environnement, ne serait-ce qu'en y prélevant sa nourriture, mais aussi par un nombre considérable d'actes de plus en plus sophistiqués allant de l'ouverture de passages (du coup de hache à la construction de voies routières, navigables, ferroviaires ou aériennes), des actions destinées à accroître les ressources nutritionnelles ou de matériaux renouvelables d'origine biologique (foresterie, agriculture), aux activités extractives (mines, carrières). Il y rejette enfin ses déchets de toute nature organique, industrielle, urbaine, chimique, radioactive... Les relations de l'homme avec son environnement se font essentiellement de façon morcelée et empirique, chaque activité ayant sa propre motivation limitée dans le temps et l'espace à une fonction socio-économique.

Que ce soit le "simple" prélèvement par chasse-cueillette des peuples à ce stade économique ou la décision sophistiquée de lancer la fabrication d'un nouveau composant électronique : il y a prélèvement, usage, rejet.

Dans une confusion intellectuelle, variable mais toujours très élevée, ces diverses activités socio-économiques interfèrent avec notre environnement et ceci de façon d'autant plus drastique que l'impact humain s'est accru très récemment

a) par le nombre de ses habitants,

b) par des technologies surtout physiques, chimiques parfois biologiques de plus en plus puissantes *per capita*.

Il s'en est suivi des conséquences sur l'environnement dont l'évaluation, encore très partielle (si ce n'est à l'occasion de catastrophes ou de gênes esthétiquement visibles), et les éventuelles corrections d'ordre technique (accompagnées éventuellement d'une action culturelle et juridique), devraient relever d'une grande discipline appliquée synthétique que l'on pourrait appeler l'environique (au sens de gestion de notre environnement, p. 21).

Cette technologie reste encore à naître ; si des préoccupations environnementales se sont fait jour et ont entraîné une prise de conscience politique parfois aigüe et une cascade de réponses ponctuelles plus ou moins appropriées, il reste à la mettre en oeuvre.

Il est en effet paradoxal que l'écologie, qui devrait être un moyen d'optimiser et de choisir nos actes, conduisant à un meilleur usage, y compris économique, de notre milieu, produise surtout des constats perçus comme alarmistes, alors que, pour des raisons de carences de moyens, ces constats ne peuvent refléter que très partiellement la situation réelle.

La notion de catastrophes écologiques résume assez bien les difficiles relations **de l'homme avec son milieu.** < < **...une catastrophe écologique constitue un évènement désastreux déclenché par des causes d'origine naturelle et/ou anthropique, qui exerce ses effets sur de vastes surfaces et pendant une durée prolongée. Ses conséquences peuvent se traduire par une mortalité importante des individus qui lui sont exposés et par une atteinte à la santé des populations humaines qu'elle affecte. Elle cause souvent en outre des dommages économiques considérables résultant de son impact sur les activités humaines et sur les ressources biologiques. Une catastrophe écologique se caractérise donc aussi par l'induction de perturbations transitoires ou permanentes dans les communautés vivantes qu'elle affecte. U peut en découler des pertes de diversité spécifique - avec un appauvrissement du patrimoine génétique -, une diminution considérable de La productivité biologique à la suite des altérations résultant de l'impact du phénomène sur le (lux d'énergie et le cycle de la matière, enfin, parfois même il en résulte une destruction totale des écosystèmes concernés.** > > (Ramade, 1987).

RAMADE expose l'importance de ces catastrophes et les classe en fonction de leurs causes initiales : 1) géophysiques (tremblements de terre, volcanisme, raz. de marée), 2) climatiques (cyclones, froids exceptionnels, inondations et sécheresse), 3) anthropiques (érosion des sols, déforestation), 4) démographiques (surpopulation), 5) technologiques (pollutions majeures et "hiver nucléaire" post-conflictuel). Notons que, hors les catastrophes géophysiques, où l'aptitude de prévention humaine reste limitée, les moyens techniques actuels permettent de limiter - mais aussi d'aggraver - les causes climatiques et l'homme a la responsabilité totale des causes anthropiques, démographiques et technologiques.

Réduire les nuisances, allant jusqu'à des catastrophes, résultant d'activités humaines, est un objectif politique (socio-économique) où l'écologie devrait jouer un rôle scientifique déterminant. Par ailleurs, et complémentirement, l'écologie pourrait, (devrait) être appliquée pour une utilisation intelligente (donc non aveugle) des systèmes écologiques et constituer une source d'innovation d'écotechnologies issues de la connaissance effectivement intégrée de ces systèmes. En d'autres termes, les études écologiques sont un moyen de réduire l'impact anthropique global dû au produit (démographie) x (consommation) et une source de progrès techniques cohérents avec notre environnement.

De même, l'écologie n'a pas pour objet d'étudier les effets sur l'homme des produits de l'homme tels les médicaments, mais peut jouer un rôle dans l'appréciation de ceux que l'homme s'applique à lui-même *via* les systèmes agro-écologiques de production (notamment les fongicides, aux effets déjà négatifs dans les sols, p. 499, BOUGUERRA, 1987).

Contribuer à réduire les situations désastreuses où se place l'homme par ses actes et optimiser l'usage anthropique de notre milieu impliquent un changement d'attitude à laquelle, de toute façon, nous serons contraints (p. 522).

Evidemment l'écologie ne peut seule résoudre tous les problèmes. Toutefois, elle peut contribuer grâce à une intégration effective de nos connaissances à une économie de moyens *per capita*. En l'état de notre ignorance, cette économie de moyens est en fait difficile à estimer, mais est certainement considérable ; elle sera maintenant évoquée sur quelques exemples.

8.6.2. Optimisations utilitaires des milieux

Pour annuler les effets des distorsions des connaissances évoqués au paragraphe précédent, nous n'avons pas d'autres recours qu'une reconnaissance objective des systèmes écologiques pondérée par l'importance quantitative relative de leurs divers états et cinèses dans ceux-ci... ce qui nous reste largement inconnu et que je n'évoquerai ici que par quelques exemples familiers et évidemment interactifs.

1. La cohérence biophysicochimique : cas des sols

L'activité humaine sur l'espace, essentiellement rural, présentement ne réussit clairement que dans les domaines où la simple somme des spécialités scientifiques, prises isolément, suffit à assurer la viabilité économique. A l'inverse, une approche écologique intégrée qui n'est isolément ni biologique, ni physique, ni chimique est objectivement seule valide au niveau des mécanismes effectifs des syntégrons et subécosystèmes où vie et abios interagissent intimement (p. 63).

Ceci est vrai pour les systèmes aériens ou hydriques, voire économiques (p. 521) mais devient particulièrement sensible dans le sol où l'intégration spatiale des syntégrons est importante et où la durée des composants est grande car relativement "stabilisée" par la phase solide (p. 143).

Aborder les problèmes d'érosion, de latérisation ou salinité, de stabilité structurale, de portance du sol, d'infiltrabilité en terme physicochimique ou les problèmes liés à l'économie de l'azote en terme alternatif (et indépendamment) de chimie, de biologie ou de pollution, ont conduit à la situation actuelle : il y a un gaspillage considérable de moyens.

Les sols cultivés ont souvent une dégradation physique croissante qui réduit la portance aux machines et au bétail, l'infiltrabilité des sols, aggrave la salinité, la latérisation, l'émanation de CO₂ et illustre les limites des actes humains dans l'écosphère.

Les engrais, mal utilisés par les plantes, quittent les sols pour devenir des polluants. L'énergie, mécanique ou investie en engrais, va croissante dans de nombreuses cultures. La végétation, souvent inadaptée au milieu ainsi créé, nécessite des interventions pesticides nombreuses tandis que la matière organique des sols devient insuffisante et a-fonctionnelle en raison de la diminution de la production organique végétale globale (élimination des adventices par herbicides, ...), de l'oxydation intempestive des molécules organiques (travaux mécaniques aratoires, ...) et d'une incorporation médiocre (p. 478, 484).

(les dégradations pédologiques qui peuvent revêtir une grande importance (il y a chaque année au niveau du globe la perte de l'équivalent de deux fois la Belgique en terres cultivables) sont sévères tant dans les sols traditionnellement cultivés et fertiles, mais intensifiés, que dans les sols tropicaux où de nombreuses techniques semblent inadaptées (LAL, 1987). Des alternatives techniques peuvent être envisagées (<•/• ci-dessous) pour corriger ces effets.

2. Amélioration de l'usage d'éléments biogènes (engrais)

La connaissance des mécanismes intimes du fonctionnement des sols permet une utilisation directe de l'énergie chlorophyllienne (d'origine végétale) pour fixer l'azote compensant en partie au moins les exportations dues aux récoltes ou améliorant un statut nutritif déficitaire, dette fixation intervient par un mécanisme

microbien, associé ou non en symbiose. Ce mécanisme important est toutefois dépendant de certaines circonstances écologiques précises (milieu, végétaux, saisons), car les microorganismes responsables de cette fixation ne fixent qu'en carence d'azote, les germes fixant inutilement étant éliminés par compétition, en raison du coût énergétique de cette fixation.

Ainsi les formes hydrosolubles lessivables (NH_4^+ , NO_3^- , K^+), rares dans les systèmes écologiques (hors agropatiques : labours, apports massifs d'engrais toujours délocalisés par rapport aux syntégrons fonctionnels, ...) seraient quasi instantanément assimilées par les végétaux ; elles seraient non lessivables grâce à un enchaînement intime des composants. Par ailleurs, les systèmes à mycorhizes joueraient en environnement précis et organisé leur rôle d'aide à l'assimilation des éléments peu mobiles, tel le phosphore.

A l'opposé, l'azote des engrais est très peu assimilé (= 30 %) dans les cultures céréalières et est largement perdu :

1) par dénitrification, ... les microorganismes utilisent ces formes présentes en excès comme source d'énergie ! Ce que d'aucuns considèrent comme un moindre mal puisque les nitrates sont aussi des polluants et que cette dénitrification serait dépolluante (CHALAMET *et al.*, 1987),

2) par lessivage vers les nappes phréatiques sous forme hydrosolubles.

Ces pertes tiennent à l'ignorance des processus de transfert normaux des éléments biogènes aux plantes.

Il est clair qu'il est aisé et facile d'employer des engrais hydrosolubles, assimilables directement par les racines, mais également directement lessivables, et - quant à l'azote - apporté en grande quantité dans des microsites éloignés des racines assimilatrices. La connaissance des mécanismes réellement fonctionnels en conditions d'équilibre dynamique, aujourd'hui observables *in situ*, permet une réévaluation des pratiques et leur optimisation.

Les apports d'éléments biogènes au sol (engrais, amendements, oligo-éléments) pourraient être assurés sous une forme permettant

1) leur localisation spatiale dans le biosol (p. 149) et non comme actuellement par apports diffus des engrais en granulés, liquides ou poudre sur le sol, dans le sol ou dans les rangs de semis,

2) leur disponibilité temporelle liée au rythme journalier des besoins végétaux (dépendant de la température et de l'humidité).

Ces nouvelles formes d'engrais "bioefficients" non hydrosolubles, mais enfouis et libérés via les lombriciens, dépendraient, de façon synchrone et spatiale dans les mêmes microsites, des conditions hydrothermiques régulant la végétation.

3. Pratiques phytosanitaires

Par l'apport ménagé, régulier et cohérent des éléments nutritifs par recyclage, grâce aux engrais bioefficients (c/. ci-dessus) et par la fixation d'azote, l'équilibre physiologique des végétaux ne souffrira pas ou peu des distorsions. Ces distorsions, tel l'apport massif d'engrais, entraînent la turgescence excessive de cellules et favorisent les attaques parasitaires tant fongiques qu'animales (*Aphididae*). Les inoculum parasitaires recyclés avec les débris végétaux morts de l'année précédente seront détruits par l'ingestion de ceux-ci dans le tube digestif des décomposeurs macrophages (lombriciens surtout). Enfin les régulations symbiotiques ou rhizosphériques contribueraient à cette santé végétale prévenant la nécessité de traitements chimiques.

Ces traitements entraînant à leur tour des déséquilibres importants dans les mécanismes les plus divers (déséquilibre du complexe parasitaire, élimination de lombriciens, trophobiose, stimulation gonadique de certains parasites, ...) conduisent à d'autres traitements. Ces pis-allez pourraient être réduits surtout si des moyens de lutte biologique ou d'agronomie intégrée (p. 505) étaient mis en oeuvre.

Cela revient à une évaluation des pesticides (p. 480) dont l'impact sur les systèmes écologiques peut être multiforme et révèle des propriétés très variées.

Par exemple, dans un verger de pommiers on a montré, depuis longtemps (Raw, 1962), l'importance des lombriciens comme enfouisseurs de feuilles mortes. Cet enfouissement entraînant de très nombreuses conséquences, notamment la quasi éradication des inoculums de germes phytopathogènes qui hivernent dans ces feuilles, telle la tavelure. C'est également le cas du lépidoptère *Gracillariidae* (*Lilhoculelinan*) *Chytlonorycter blanchardella* (F.) dont les chenilles mineuses occasionnent des dégâts non négligeables (GRUYS *et al.*, 1973) mais aussi des parasites de ce dernier notamment les Hyménoptères Braconidae *Pholese.tor pedias* (Nixon) et encore plus *P. ornigis* (Weed) (LAING *et al.*, 1986) : le tout est ingéré par les lombriciens anéciques.

Mais cette évaluation ne saurait être limitée à quelques aspects phytosanitaires mais devrait comprendre également les fonctions de recyclage et d'économie des éléments biogènes (e/. ci-dessus), le travail biologique pouvant aller jusqu'à permettre l'élimination du travail du sol (cf. ci-dessous : 4) et en conséquence une optimisation énergétique (<:/'. ci-dessous : 5). Les actes phytosanitaires, comme tous actes sur système écologique, pour être bien appréciés, implique(rai)ent une connaissance de ceux-ci (agrosystèmes) sans préjudice d'une appréciation effective de ces produits au plan de la santé publique (ce qui n'est pas du ressort de l'écologue) (ANONYME, 1987b).

4. Pondération des usages mécaniques d'énergie

Outre la réduction des opérations d'apports d'engrais et surtout de pesticides, réduisant les interventions mécanisées, les opérations d'assainissement et les travaux aratoires seraient également minimisés. Les labours destructeurs de structures et oxydant la matière organique à contre temps (à l'automne en général, et toujours hors végétation) pourraient être réduits, voire proscrits, au profit de travaux superficiels ou du semis direct.

Si ce dernier est pratiqué à la saison correcte (début d'automne) et en complément du labour biologique des lombriciens, il y a enfouissement de litière, dont les pailles, remontée modérée des horizons profonds, drainage du profil et "grumelage" superficiel (p. 479).

Les coûts des opérations d'assainissement dans les parcelles (drainage, tassage, ...) pourraient être diminués en raison de l'existence d'un microdrainage diffus et généralisé de galeries animales évitant les engorgements temporaires locaux.

La portance des sols et la qualité des lits de semence seraient enfin améliorées par les structures grumeleuses naturelles des agrégats (LaisUS, 1985).

Les tassements, résultant du passage des engins, seraient d'autant moins sévères que ces passages sont plus rares et appliqués sur des sols structurés, stabilisés et microdrainés. La réduction des interventions mécaniques limite elle-même leur nécessité, par ailleurs coûteuse. Toutefois pour certaines productions végétales, telle la betterave, un labour préalable et quadnannuel peut s'inscrire dans un assolement (FRANK1NET *et al.*, 1979).

5. Valorisation énergétique de la nécromasse diffuse

L'importance quantitative de l'énergie chlorophyllienne émanée par les plantes est de fait inconnue (p. 502) mais serait au moins de l'ordre de 1450 Terawatt/heure en France pour la partie aboutissant au sol de façon diffuse et irrécupérable (= débris végétaux dispersés) (BOUCHE, 1980b). De cette énergie végétale fort peu est utilisé par l'homme.

Une utilisation raisonnée de cette énergie diffuse non collectable dans la parcelle est toutefois possible via les lombriciens qui assurent à la fois des travaux

D'une façon générale, les actes obligent, à un investissement énergétique. Les techniques actuelles, nombreuses et puissantes, entraînent une spirale croissante d'autres techniques devenues nécessaires par l'enchaînement des perturbations des systèmes écologiques consécutives à leur usage (p. 479). Globalement le rendement énergétique est lié au degré d'artificialisation des systèmes. Inversement, le rendement croît avec l'utilisation des autorégulations écologiques fonctionnant avec l'énergie biochimique endogène d'origine chlorophyllienne.

Notons que cela revient à apprécier empiriquement dans un système écologique la part de l'autorégulation énergétique du système écologique et la part de régulation imposée par les actes humains sur ces systèmes. L'artificialisation pourrait être appréciée par la quantité d'énergie investie par l'homme dans le système.

La quantification de ces intrants énergétiques est réalisée depuis quelques années de façon de plus en plus complète et précise notamment sous l'impulsion de D. PIMENTEL (cf. par exemple PIMENTEL, 1980).

7. Multi-usages économiques

L'utilisation de l'espace est toujours sous la dépendance de rationalités diverses. Si au niveau de la parcelle ou de l'exploitation, le décideur affecte souvent un usage exclusif à une portion de l'espace, cette décision relève d'un choix privilégiant une filière de production (monoculture, carrière, roule, ...). Toutefois, les systèmes à multi-usages (p. 507) sont nombreux et peuvent faire l'objet de plusieurs revenus complémentaires (= coproductions : chasse, tourisme, agriculture, autarcie relative, ...) en organisant la production pour plusieurs filières économiques.

Les parcelles, comme tout système écologique, sont un système ouvert. Elles émettent par exemple les excès d'azote ammoniacal des lisiers de porcs qui y sont déversés (incidence locale) et le CO₂ de sa minéralisation (incidence planétaire). Ce système alimente la nappe phréatique en eau plus ou moins chargée, régule les ruissellements du bassin versant, etc. A cette insertion dans le système écologique général, s'ajoutent les effets des décisions économiques d'apports énergétiques (travail), chimiques, nutritionnels, aqueux (irrigation, ...) ou d'exports (récolte, extraction, ventes, ...) ; faune et flore sauvages sont régulées et sont affectées par ces multiples décisions.

Même dans les cas de simplifications extrêmes, la chaussée d'une autoroute par exemple, la portion d'espace ne peut être évaluée de façon sectorielle. Ainsi les écoulements hydriques (et leur charge chimique), les émanations gazeuses, les mortalités de faune sauvage entraînant un changement de comportement des charognards, les possibilités de migration des gros gibiers, etc. seront modifiés par cette structure autoroutière.

Toute approche spécialisée de l'usage de l'espace se justifie analytiquement ; synthétiquement elle est une carence de l'optimisation utilitaire des milieux. Toute étude du rôle d'une portion de l'espace, à toute échelle, est nécessairement une étude de système écologique où l'homme agit (actes).

Les motivations des actes (p. 272) sont du ressort d'études socio-économiques (p. 98). Les études des systèmes écologiques portent par contre sur les interactions biophysicochimiques "spontanées" (p. 52, 63, 72, 88). Elles peuvent objectivement être prises en compte (2ème partie) et de façon opérationnelle et intégrée (chap. VII). L'optimisation de l'information sur les systèmes écologiques (y compris actes humains) est possible à tous les niveaux de la perception des multi-usages de l'espace et devrait être méthodiquement conduite.

8.6.3. La rétroaction : le rôle culturel

En devenant opérationnelle, l'écologie modifie considérablement les possibilités et modalités d'action de l'homme sur son milieu : elle responsabilise à la fois les acteurs et les écologues (p. 472).

En conséquence, les rapports de ces acteurs (effectuant essentiellement des actes techniques) avec l'écologie (essentiellement une science) doivent être ceux d'un praticien vis-à-vis d'une connaissance. L'acteur mettant en oeuvre des outils physiques, chimiques ou/et biologiques apprend les connaissances minimales nécessaires à la mise en oeuvre de ces outils et souvent une amorce de conceptualisation logique (mathématique) aux divers niveaux de ses responsabilités (d'ouvrier, d'entrepreneur, de responsable politique, ...). Agissant sur les systèmes écologiques, il se devra de les connaître "sullisaminen!".

Faire ce constat d'évidence ne résoud cependant pas le problème posé par la situation actuelle, profondément insatisfaisante. Même dans l'enseignement supérieur, l'écologie est souvent réduite à ses seuls aspects écobioécologiques et, pour l'essentiel, les acteurs ne la perçoivent qu'à travers un discours obscur où n'émergent que des contraintes vis-à-vis de leurs pratiques usuelles. Cet obscurantisme prend des aspects très divers qui ne sauraient être éludés car limiter celui-ci commande le développement de l'écologie qui, lui-même, conditionne la solution de problèmes socio-économiques majeurs.

Cet obscurantisme a d'évidentes sources historiques dont l'une est, jusqu'à présent, l'absence d'une écologie pleinement opérationnelle et dont une autre est le confort intellectuel des techniques institutionnalisées sectoriellement sur la base de leurs succès antérieurs (p. 460).

1. Scientisme et obscurantisme

Nous avons déjà évoqué l'enchaînement séquentiel des techniques qui, par leurs inconvénients, obligent à des actes additifs et finalement, obèrent toute une économie.

Les "progrès" de l'agriculture intensifiée à l'aide de moyens physicochimiques sont évidents en termes de rendements pondéraux à l'hectare mais ont été contestés par un courant minoritaire actif tendant à rechercher ces progrès par d'autres moyens. Ces moyens de substitution sont essentiellement un recyclage systématique des matières organiques disponibles jouant le rôle de fertilisants et des mesures phytosanitaires préventives, exceptionnellement curatives ; dans ce dernier cas, la préférence va à des moyens biologiques. Cette forme d'agriculture s'efforce de faire prévaloir une qualité supérieure de ces produits sous le label "biologique" et décrit les produits de l'agriculture dominante comme "chimique" (obtenus à l'aide de moyens chimiques). Il est à noter que l'agriculture biologique se nomme en langue anglaise "organic farming" à partir d'une de ses pratiques essentielles.

Notons d'abord que les deux agricultures ne sont pas deux approches homogènes. Il existe bien des agricultures "conventionnelles" qui refusent par prudence ou par économie, un usage intensif des moyens physicochimiques dont les qualités ont été pourtant mises en évidence "expérimentalement" (en fait par statistiques décisionnelles fondées sur un nombre réduit de caractéristiques, p. 384). L'agriculture biologique elle-même est enfin sous l'influence de diverses "écoles" ne prônant pas nécessairement les mêmes techniques ni la même approche.

L'agriculteur biologique, exportant des produits de ses parcelles souvent vers la ville, appauvrit nécessairement le sol de ses parcelles en éléments biogènes (N, P, K, ...). Il limite cet appauvrissement par des "non-excès" en ce sens que, n'utilisant pas d'engrais minéraux, les plantes ne font pas de "consommation de luxe" (notamment taux d'azote anormalement élevé) ce qui minimise les exportations. Il compense enfin les exportations par l'achat de produits organiques... provenant souvent d'une agriculture conventionnelle.

Entre ces deux "agricultures" c'est tout une philosophie qui bascule.

L'objectif productiviste, longtemps prioritaire, a aidé à la mise en place, techniquement logique, d'une succession additionnelle de correctifs appliqués à un agroécosystème inconnu car jusqu'à récemment indescriptible. Toute une justification expérimentale (par comparaison d'actes), complétée de traitements statistiques sophistiqués, permet de montrer des différences "hautement significatives" entre traitements mais nullement une connaissance des mécanismes liés à ces différences. L'autorité résultant de l'usage d'outils "scientifiques" devient un argument pseudoscientifique (= scientisme) lorsque leurs résultats sont extrapolés hors de leur contexte initial, très sectoriel. Il y a développement d'un dogme du progrès appliqué sans base scientifique sur un système inconnu.

Par réaction, ce dogme a induit en agronomie une attitude basée sur une perception également a-scientifique fondée sur le mythe de "propriétés" biologiques et astrales nécessairement mal perçues et mal comprises (WOLLESEN, 1987). Une "agriculture biologique" s'est ainsi modestement développée en écartant *a priori* et radicalement de nombreuses pratiques impliquant notamment l'usage de produits chimiques. Ce faisant, elle écarte à la fois les risques liés aux usages a-systémiques et s'interdit tous les bénéfices potentiels des nouvelles techniques : c'est la prudence élevée au rang de principe.

Cette prudence n'écarte d'ailleurs pas tous les risques (telles les conséquences environnementales pernicieuses de l'usage du sulfate de cuivre, "tolérée" par ces praticiens). Cette prudence fonde sa motivation sur un respect *a priori* d'un ordre naturel harmonieux qui, derrière une rhétorique fumeuse, rappelle finalement la cohérence systémique du champ écologique (p. 72, 88) et tente, malgré tout, de modifier, toujours aussi empiriquement, cet ordre au profit d'une production agricole.

Elle s'oppose souvent caricaturalement au dogme productiviste. Elle s'accompagne encore parfois d'un obscurantisme transcendantal qui n'a rien à voir avec les pratiques des sciences exactes et des techniques : ici l'obscurantisme rejette le scientisme.

La démonstration des qualités techniques des procédés et produits des deux démarches s'appuie dans les deux cas sur l'analyse technique expérimentale : comparaison de quelques paramètres, dits "facteurs", à quelques résultats (rendement, poids sec des produits, excès de nitrates dans les produits, ...), avec cette différence que l'agriculture biologique dispose de beaucoup moins de moyens pour de telles démonstrations. Une tentative de bilan conduit à un jugement nuancé (BONNY et Le Pape, 1984).

Il est évident qu'aujourd'hui nous disposons d'une gamme considérable d'outils techniques qui quelles que soient leur ancienneté, leur origine (machinisme, chimie, sélection de variétés rustiques ou exigeantes — fragiles) mériteraient d'être réévalués dans le contexte réel de leur usage hors de tout mythe ou dogme.

Une parcelle agricole ne peut être réduite à un champ d'exercice pour chimiste ou pour généticien, même manipulateur de gènes, c'est un système complexe qui mériterait d'être connu comme tel - et non appréciée à travers une somme disparate d'observations particulières non intégrables. C'est également un sous-système des systèmes socio-économiques et un des systèmes écologiques.

Nous avons aujourd'hui la possibilité, au moins sur des cas critiquement sélectionnés, de réduire ces oppositions entre mythes et dogmes sur une base rationnelle et objective.

<... on mesure aujourd'hui beaucoup mieux les coûts de l'intensification des productions et de l'artificialisation des milieux à usage agricole : exode rural, surproduction, "gel" des terres, appauvrissement des sols et de la faune, pollutions.

Plutôt donc qu'une protection limitée et passive et qu'une exploitation aveugle dévoreuse du milieu et de sa richesse, on s'oriente vers une réflexion globale sur

l'aménagement du territoire vers une gestion de l'espace rural (et pas seulement "naturel", protégé, ou à usage agricole) ; vers une gestion des ressources naturelles et du cadre de vie ; enfin, on l'espère, vers une exploitation plus soucieuse des règles biologiques et écologiques, de ce qu'il convient d'appeler le patrimoine naturel > ...

<< L'opposition que faisaient les agronomes latins entre le "salus" (terres incultes - mais à usages multiples, il faut le souligner) et "l'ager" (terres cultivées) resurgit.

Or notre dynamique historique, depuis les moines défricheurs du Moyen Age, nous a toujours conforté dans, et entraîné vers, un expansionnisme de l'espace rural et non vers une régression, un repli - ou la diversification.

Condamné au productivisme, victime de son succès, le monde agricole a longtemps refusé d'autres modes de développement.

Force lui est désormais de constater que, schématiquement, la vieille confusion entre espace "naturel" et espace agricole se transforme en un clivage entre espace rural (où l'agriculture est une activité à compléter, voire complémentaire) et espace agricole à usage intensif. > > (Lac'OUR, 1987).

Les pièces du puzzle nécessaire existent (pas toutes, faute d'études d'ensemble) que ce soit les recherches en lutte biologique, les études pour des travaux aratoires mieux raisonnés ou supprimés, un début de connaissance effective des cycles d'éléments dans le champ écologique. Il ne faut pas sous-estimer la grande difficulté qui se présente aujourd'hui à développer une utilisation rationnelle des acquis de l'écologie, perçue par la majorité des agronomes comme une simple mésologie comme en témoigne encore récemment un important manuel à destination des ingénieurs agronomes (ANONYME, 1974).

Faute d'une mise en oeuvre systématique d'une approche écologique (p. 477) au moins pouvons-nous évoquer quelques potentialités offertes par celle-ci, à l'interface écologie/socio-économie.

2. Certitudes technologiques et écologie

Dans la pratique ce sont les diverses actions de l'homme, les diverses techniques traditionnelles (agriculture, mines, industrie, hydraulique, ...) qui prennent peu en compte les contraintes environnementales. En effet si l'homme utilise nécessairement un certain savoir dans son action, celle-ci est d'abord guidée par l'empirisme, ensuite par diverses règles sociales (dont religieuses) et récemment par une méthodologie inspirée, parfois même issue, de la démarche scientifique.

Le praticien, le technicien, l'ingénieur pour agir ne peuvent pas se poser des problèmes (ou trop de problèmes) hors du contexte de leur action... ou ils n'agiraient plus. Les décisions prises dans chaque "unité de production" (ferme, atelier, communauté urbaine, usine, ...) se font en fonction des objectifs les plus immédiats (dans l'espace, le temps, la composition) aux motivations socio-économiques directement perceptibles par les intéressés : à ce stade déjà les décisions sont souvent difficiles.

Si à l'intérieur de certaines corporations une méthodologie et une technologie, parfois très sophistiquées se sont développées pour aider à la prise de décision, hors de leurs objectifs, les conséquences de ces décisions échappent à toute évaluation rigoureuse. C'est par les dérèglements (accidents, catastrophes) et les réactions sociales (écologisme) que l'ingénieur est remis en cause. C'est aussi par un discours naturaliste et quelques grands principes généraux, difficilement réductibles à une pratique socio-économiquement appréciable, que les contraintes environnementales sont souvent décrites.

L'empirisme, doublé de connaissances rationnelles mais très parcellisées (= restreintes à des disciplines techniques) a permis des progrès quantitatifs et qualitatifs. Toutefois les motivations économiques, techniques ou scientifiques restent largement ponctuelles et l'appréciation des conséquences de nos actes reste partielle et donc partielle.

Cette situation tient pour partie à l'approche sectorielle de chaque discipline agissant sur notre environnement, voire à la suffisance intellectuelle qui peut l'accompagner ; elle tient aussi à la carence de l'écologie qui devrait en tant que science opérationnelle contribuer, à côté des autres disciplines, à une élaboration de l'environnement.

Mal dégagée de l'histoire naturelle dont elle procède, l'"écologie" actuelle produit souvent (mais pas toujours) des "théories" encore très floues, peu concrètes et généralement peu opérationnelles (p. 471 : DE ZEEUW). Nous avons vu dans les chapitres précédents que cette situation peut très rapidement évoluer.

L'impact de l'homme devenant chaque jour plus important sur son environnement, c'est-à-dire sur l'ensemble de la biosphère, le poids des décisions humaines face à celle-ci, face à ses auto-régulations spontanées est chaque jour plus déterminant.

Si longtemps cette action humaine a été autrefois infime - parmi le cortège des autres interactions des écosystèmes - il en est chaque jour de moins en moins vrai. Si chaque personne a pris conscience que l'humanité peut aujourd'hui s'anéantir au plan militaire, chacun sait qu'elle peut aussi progresser en bien-être mais ce progrès - et ceci est moins évident pour beaucoup - ne peut être réel et durable que s'il modifie l'écosphère dans un sens dont les conséquences à court, moyen et long termes sont globalement adéquates avec sa maintenance.

Ceci implique une prise en compte globale de nos actes sur notre environnement constitué notamment des autres organismes qui peuplent cette terre. Ces autres organismes, dont nous avons besoin ne serait-ce que pour nous nourrir, interagissent entre eux et dans les systèmes complexes que l'écologie sait potentiellement étudier maintenant qu'elle dispose des moyens de synthèse qui lui ont fait défaut.

De ce point de vue, l'humanité a un impératif besoin d'une écologie réellement scientifique et rigoureuse pour corriger les déséquilibres engendrés par le progrès sectoriel des disciplines qui ont pu elles-mêmes atteindre à une bonne rigueur avant l'écologie, telles la physique, la chimie et la biochimie au niveau moléculaire. Elles ont engendré des applications puissantes aux conséquences globales actuellement non appréciées.

L'écologie apporte précisément, en tant que science opérationnelle (chapitre Vil), par intégration et étude discriminante, le moyen modulé d'apprécier les conséquences écologiques, donc partiellement socio-économiques, de nos actes.

"Partiellement" socio-économique : sujet délicat. Il est clair que l'écologie n'étudie pas les choix économiques, sociologiques, éthiques, religieux... locaux... Elle peut contribuer à apporter une information adéquate pour un décideur, en aucun cas elle ne peut dépasser ce rôle d'apport d'un savoir. Au niveau du décideur, l'étude écologique complète l'approche socio-économique.

Dans un tel contexte, l'écologie peut éclairer les décideurs et très certainement apporter des réponses à certains problèmes... à commencer par ceux qui ont conduit ces dernières années à des impasses, faute d'une écologie opérationnelle.

Mais cet aspect de sauvetage, de rattrapage, de correction de situations antérieures devenues critiques, ne constitue pas, et de beaucoup s'en faut, le principal intérêt des applications de l'écologie.

En fait, les disparités considérables du développement scientifique et technique nous donne une vision déformée, biaisée et incomplète des systèmes écologiques et par suite économiques et sociaux, sur lesquels nous agissons. L'écologie discriminante devrait révéler des carences spectaculaires qui expliqueraient *a posteriori* nos erreurs passées mais surtout permettrait d'en réduire la portée, voire dans le futur, l'existence. En fait l'écologie permettra de prendre, en connaissance de causes (intégrées), les décisions.

Seules, l'applicabilité potentielle, la démonstration de faisabilité et la qualité scientifique des démarches, ne sauraient suffire. Il ne suffit pas d'avoir, à partir d'une préoccupation sectorielle, une approche écologique ; il ne suffit pas culturellement de faire preuve d'indiscipline vis-à-vis des disciplines institutionnelles (LEGAY, 1986) ; il faut intégrer effectivement, et non verbalement, l'écologie.

Actuellement, chaque discipline progresse pour son propre compte, chaque recherche agro-environnementale sérieuse, transgressant les limites orthodoxes, tente de tenir compte des autres paramètres jugés importants vis-à-vis de l'objectif de recherche spécifiquement poursuivi.

Malgré ce désir d'intégration, cette "indiscipline", cette prise en compte de faits généraux, il s'agit du talon d'Achille de ces études. N'est retenu que ce qui est "jugé" important, à partir ... de connaissances classiques et des progrès connus de quelques disciplines et non de ce qui est réellement essentiel dans les systèmes écologiques en cause.

Nous l'illustrerons d'un exemple. Dans un récent colloque sur le rôle de l'écologie dans l'agriculture contemporaine (EIJACKERS et QUISPÉL, 1988), DUYNISVELD *et al.* (1988) étudient les facteurs influant la lixiviation de l'azote des sols cultivés vers les nappes aquifères d'eau potable et les principaux moyens de limiter cette nuisance. Cette belle étude, témoignant d'une volonté d'intégration, énumère 14 facteurs influençant cette lixiviation et ayant trait au climat, sols, cultures et modalités d'apport d'azote.

Simultanément, dans le même colloque ELLIOT et COLEMAN (1988), partant d'une autre optique disciplinaire, démontrent, l'importance dans les transferts de la percolation via les galeries de lombriciens et l'influence des agropatiques sur cette percolation zoocontrôlée.

Pourquoi ce facteur a-t-il été négligé dans la première étude ? Dans la démarche intellectuelle classique, les lombriciens "n'existent pas". Aucun Système-Expert tenu à jour ne signale que, malgré la rareté des spécialistes, la première masse animale de l'espace rural joue un rôle important dans ce processus.

On pourrait analyser ce même colloque sous d'autres points de vue et montrer sans difficulté les limitations, souvent extrêmes, de chaque étude "écologique" ou agronomique, car non intégrée, quoique présentant probablement l'un des meilleurs panoramas de ces approches vers l'intégration.

De toute évidence, il faut changer nos pratiques pour agir ; il faut accepter l'intégration effective des acquis dans des supports informatiques transdisciplinaires et, en agronomie, environique, ... pratiquer l'écologie discriminante.

3. Démonstrativité de l'applicabilité

En raison du flou conceptuel fréquent attaché au mot "écologie", mais surtout en raison de la primauté de la démarche sociale vis-à-vis d'une science qui restait informelle (*cf.* formalisation, p. 98), la recherche "écologique" pragmatique a précédé l'élaboration rigoureuse de cette science, (les tentatives pragmatiques ont l'incontestable avantage d'avoir tiré partie de l'état de l'art - quelle que soit sa validité scientifique et technique - et d'avoir exploré les implications sociales de l'écologie).

Le fait de disposer d'une écologie, en tant que science exacte opérationnelle, permet(tra) son application dans les multiples mises en oeuvre concrètes des actes humains et, à l'occasion d'opérations concrètes remarquables, influence(ra) les acteurs sociaux par sa dimension culturelle.

Conceptuellement, l'écologie opérationnelle, grâce à sa prise en compte des actes, est indépendante des sciences humaines. Ceci est vrai opérationnellement,

scientifiquement et techniquement mais occulte le fait que l'écologie est faite par des hommes pour des hommes.

L'écologie dépend de notre société et influe sur celle-ci, même avec ses modestes moyens actuels. Lorsqu'elle sera devenue pleinement, ce que par définition elle est, une Science... et que cette science, pleinement opérationnelle, sera socialement disponible, elle jouera alors un rôle déterminant. Elle est exactement à la conjonction des trois grandes sciences exactes du concret : biologie, chimie, physique : elle s'appuie sur les développements logiques de la mathématique et des outils informatiques et elle est la science proximale de l'homme.

Dès lors les développements techniques applicables de l'écologie - c'est-à-dire son utilisation ou plutôt son applicabilité jouera un rôle essentiel.

Dès lors l'homme, comme acteur central, comme décideur du développement de cette science, comme utilisateur des techniques qui en sont issues, comme acteur agissant sur l'objet de cette discipline, l'écosphère, est directement concerné par l'état des connaissances qu'elle produit.

L'éducation, dans ses diverses modalités (enseignements primaire, secondaire et supérieur ; démonstrations ; exercices ; développements ; réalisations concrètes; ...), joue un rôle-clé dans l'utilisation effective des acquis écologiques.

Dans ce livre, cette préoccupation pédagogique a été minorée. Le renforcement intrinsèque de l'écologie a été privilégié par rapport au rôle extrinsèque (social) de cette discipline.

Il n'en reste pas moins que l'écologie comme toute science est un développement humain. Il faut donc s'efforcer d'évaluer les projets de recherches et les développer en tenant compte simultanément de leur applicabilité et de leur valeur éducative (DI CASTRI *et al.*, 1984). Cette évaluation ne devrait pas être une simple référence à une application dans l'écosphère mais devrait également porter sur la vérification de la prise en compte de l'organisation connue des systèmes écologiques, à commencer par le respect des lois physiques fondamentales liées aux interactions de la matière et aux conséquences qui en découlent *ipso jado*, en thermodynamique notamment (chap. 1).

Par exemple, s'extasier sur les potentialités des manipulations génétiques, sans en mesurer les limites, relève de l'absence d'une expertise écologique. Oublier par exemple le rôle inévitable, congénital aux lois physiochimiques, de la compétition (p. 69) est fréquent du fait des supputations nées de recherches très parcellisées, comme celles de la biologie moléculaire.

Constater que le gène Nif dérépressé permet de fixer biologiquement de l'azote sans fin avec une certaine efficacité en dispositifs confinés est une chose. Extrapoler, en ignorance totale de l'écologie, cette potentialité en espérant l'implanter sur des organismes qui, libérés au champ, feront cette besogne c'est oublier son coût énergétique et l'existence de germes économes en azote mais compétiteurs *in situ* en énergie.

Tout jardinier sait depuis longtemps que les variétés qu'il a sélectionnées, du chou-fleur à l'oignon blanc, ne se développeront pas si on les cultive dans un système sans élimination des compétiteurs - dans une prairie permanente ou une forêt, par exemple. Les bactéries manipulées avec le gène Nif dérépressé - malades de s'épuiser à dépenser leur énergie métabolique à fixer de l'azote qu'elles auraient à meilleur compte énergétique en puisant dans le milieu - ne pourront rivaliser avec la myriade de souches qui, sélectionnées depuis des milliards d'années, se disputent les ressources alimentaires spontanées.

Cet exemple de proposition "biotechnologique", classique et coûteuse, est donné ici, parmi de nombreux autres, pour montrer l'importance culturelle d'une connaissance écologique, non seulement pour optimiser nos moyens d'actions (p. 477) pour ne plus être réduits à des constats alarmants (p. 490), mais également pour

éviter les développements de recherches qui, dès leur conception, portent sur des procédés inefficaces, inadéquats ou dangereux, car conçus à partir des seuls acquis sectoriels.

A cet égard, et quel que soit le caractère subjectif des appréciations sur des études écologiques, il est souhaitable de prendre en compte dans les études les trois dimensions : scientificité (valeur scientifique), applicabilité (valeur économique) et démonstrativité (valeur éducative uu/et culturelle) d'un important projet (fig. 8-5).

8.6.4. L'action

Au cours des trente dernières années une attention considérable a été portée aux "problèmes écologiques" *lato sensu* et les recherches portant sur ce domaine se sont multipliées considérablement - au moins dans certains pays (Canada, Pays Bas, RFA, Suède, USA, ...). La masse d'informations objectives (DICs) acquise a été malheureusement largement perdue, ou rendue inaccessible en raison d'une gestion informatique et d'une sémantique logique de communication insuffisantes.

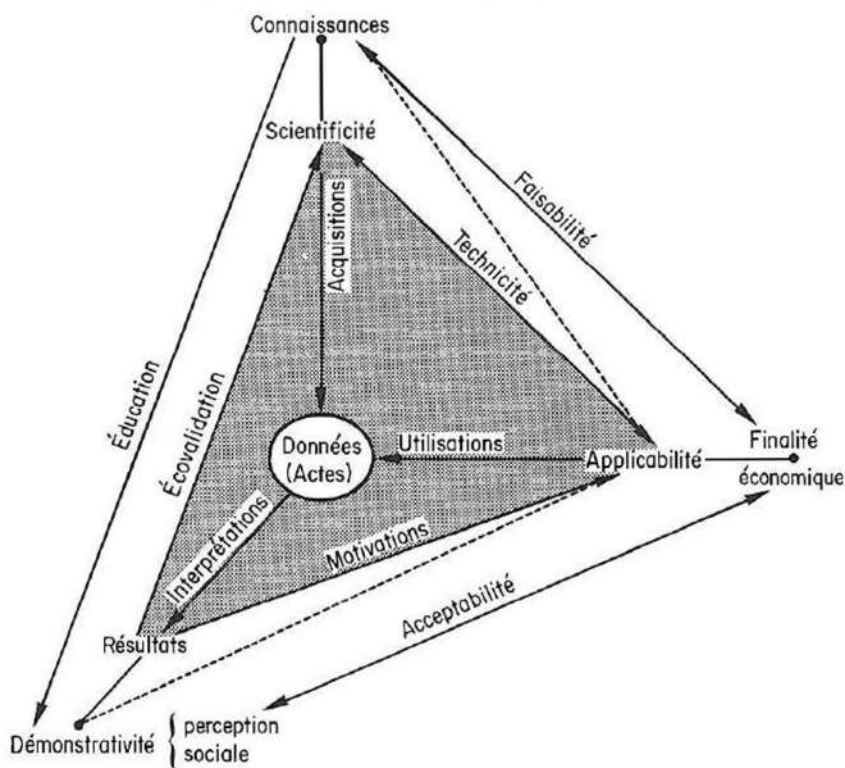


Figure 8-5 - Scientificité, applicabilité et démonstrativité de l'écologie • interactions opérationnelles internes (grisé) à l'écologie et externes (avec le domaine socio-économique).

Toutefois, les multiples études séquentielles - cloisonnées à un domaine d'étude, à un objet particulier ou à une démarche spécifique - visaient à construire et échanger dans le cadre d'une discipline (l'écologie) : en général il y avait particularisme des pratiques et communauté d'objectif.

Deux conséquences en ont résulté :

1) d'une part le développement (jamais l'hypertrophie) de quelques domaines spécialisés de l'écologie (tels une étude bocagère en paysage breton, la modélisation conceptuelle énergétique de H.T. Odum, ou les recensements ornithologiques) - ces développements, indépendants les uns des autres, ne se nourrissent pas mutuellement mais tendent à s'autojustifier ;

2) d'autre part, devant l'incommunicabilité, conceptuelle donc sémantique des informations d'études inharmonieuses et l'absence d'études complémentaires permettant une cohérence, il y a eu un certain désenchantement pour un objectif holistique pratiqué avec des outils séquentiels : les développements particuliers sont en effet, à ce stade, incompatibles les uns vis-à-vis des autres.

De fait, accumuler des données sur un domaine sans gestion et traitement adéquats n'est pas rare. De fait, échaffauder une théorie écologique inadéquate aux faits et surtout aux données écologiques est fréquent. De fait, l'élaboration d'un modèle conceptuel, sans la suite naturelle vers l'infosystémique et l'acquisition de données, est usuelle.

De fait, les experts ont souvent l'impression de prêcher dans le désert, tant leurs opinions sont inopérantes (= non opérationnelles).

Cette situation est encore présente ; elle nourrit bien des malentendus (au sens littéral !) et restreint considérablement le développement intrinsèque de l'écologie et son efficacité scientifique et socio-économique.

Nous venons de voir que les outils modernes d'échange et de communication - si l'effort intellectuel et matériel qui doit les accompagner est fait - lèvent ces freins au développement de l'écologie et inversent aujourd'hui les contraintes: ce développement ne sera plus freiné que par les limites de cet effort.

La mise en place des moyens modernes de gestion des données sur notre environnement, l'écosphère, est inéluctable. Elle est simple à exécuter moyennant un langage univoque spécifique restreint (cf. lexique, p. 564), une logique explicite objective (chap. I) et une technique relationnelle efficace (p. 312). La culture écologique s'impose, malgré son caractère encore imparfait, conjointement à la gestion des connaissances par l'informatique. Inéluctablement, le gaspillage des compétences (experts) et des faits objectifs (DICs) apparaîtra comme aberrant.

Enfin disponibles, les moyens de gestion de données objectives (DICs) et de synthèse intelligente et intelligible permettent à l'écologie d'accroître considérablement sa discipline. Deux risques opérationnels toutefois subsistent 1) celui de poursuivre les approches sectorielles au nom d'une "écologie" détournée, 2), celui de ne pas saisir la claire délimitation entre systèmes écologiques et domaine socio-économique, ouvrant la voie à tous les discours flous sur quelque "écosociosystème" emphatique et actuellement non opérationnel, même si un tel futur peut être souhaité (Anonyme, 1986b).

Mieux vaut dès aujourd'hui pallier à ces carences, ou plutôt abandonner les pratiques pré-informatiques et d'informatique classique, pour nous consacrer à la mise en ordre de nos données et à l'explicitation de nos interprétations et problématiques, même dans une Intelligence Artificielle balbutiante.

Au fur et à mesure cette "connaissance pleine", liant les faits aux règles d'interprétation, pourra être mobilisée de façon d'autant plus efficace que cette pertinence est nécessaire... Que l'on parvienne à accroître la fiabilité des interprétations sur les systèmes écologiques (y compris actes humains) et à les rendre accessibles, permettra d'aider considérablement les décideurs, par ailleurs confrontés aux impondérables d'une situation socio-économique fluctuante rendant les jugements de valeur très incertains, telle la valeur, justement appelée valeur sociale, d'un milieu, par BLANDIN (1986) ou encore la valeur d'un scénario de développement de l'agriculture (TIREL, 1987) ou d'un pronostic d'économiste.

H est nécessaire toutefois de bien distinguer la place effective de l'écologie opérationnelle dans ce processus, c'est-à-dire, d'une part les études au niveau des systèmes écologiques, et d'autre part les relations socio-économiques. Ces dernières portent schématiquement sur l'écologie selon trois "jugements"¹ de valeurs (fig. 8-5) :

1) sa scientificité : c'est le degré de vérification, de réfutabilité au concret, de cohérence aux connaissances antérieures relatives aux systèmes écologiques, et du sérieux de la démarche (ayant un objectif agronomique, halieutique, cynégétique, fondamental, environnemental, ...). Celle-ci se développant par l'acquisition et la gestion de données, leur interprétation puis par l'écovalidation des résultats ;

2) son applicabilité : c'est le jugement "économique" sur le prix que l'on est prêt à payer pour les divers actes humains sur les systèmes écologiques que les motivations soient culturelles (conservation, esthétique, alimentaires (agronomie), sanitaires (dépollution, ...), etc. Ce jugement économique n'est pas indépendant de la faisabilité technique (dont la fiabilité fondée sur des connaissances) et de l'acceptabilité (résistance ou pression) sociale ;

3) sa démonstrativité : c'est-à-dire ce qui socialement est montré (communiqué) et perçu, par la connaissance directe de résultats, d'expositions explicites, de communications médiatiques, et par l'éducation des connaissances.

L'écologue a, en tant que tel (et non en tant que citoyen) des responsabilités au niveau de la scientificité, de l'éducation, de l'état des connaissances, de l'applicabilité des résultats et de leur démonstrativité. L'étude des perceptions sociales, des modalités de décision socio-économiques et de jugements face à celle-ci sur la faisabilité des actes humains relève de cadres sociaux, juridiques, politiques et institutionnels pris en compte par les sciences humaines. Cela n'exclut pas de co-interpréter

1) les interactions entre finalité économique et structure sociale conduisant à des actes, comme par exemple, le poids des structures foncières, du cadre juridique et financier, de l'information perceptible au niveau d'un exploitant agricole dans les motivations de ses décisions techniques d'actions sur les systèmes agro-écologiques qu'il utilise,

2) les mécanismes induits dans l'écosystème par ses actes d'intrant (actes physiques, apports chimiques, etc.) et de récolte : domaine de l'écologie,

3) les propositions techniques faites par l'écologue en répondant à la demande sociale à partir de la connaissance des systèmes écologiques.

La physique a permis la maîtrise des forces, des moteurs, de l'énergie et de l'électronique. La chimie permet une maîtrise croissante des matériaux et produits abiotiques. La biologie générale, puis moléculaire et cellulaire, permet certaines biotechnologies. Nul doute que l'écologie en devenant opérationnelle engendre dans le futur une authentique éco-technologie des systèmes biophysicochimiques intégrés.

Au lieu de la position qui est aujourd'hui la sienne, celle dans le meilleur cas d'évaluer des procédés nés dans un contexte extra-écologique, appliqués sur notre environnement, pour constater leur inadéquation plus ou moins extrême, l'écologie deviendra alors une source de propositions techniques au même titre que les autres grandes disciplines scientifiques. Ceci souligne outre sa nécessaire scientificité, l'émergence d'une applicabilité pleine et entière mais aussi la nécessité d'une communication culturelle et sociale (démonstrabilité) permettant d'établir avec les spécialistes des autres disciplines un dialogue technico-scientifique objectif et avec la société les échanges lui permettant la compréhension des enjeux.

CHAPITRE NEUVIEME

CONCLUSION

Ce livre est né de la nécessité de clarification indispensable aux échanges et à la coopération cohérente à l'intérieur d'une petite équipe d'écologie dont le programme de recherche est poursuivi depuis 25 ans : il s'agit de connaître le rôle agronomique des lombriciens.

Il se trouve que rôle agronomique est strictement synonyme de rôle écologique et que, depuis le début de ce programme, les problèmes environnementaux sont devenus plus préoccupants, de sorte que écologies fondamentale et appliquée s'y confondent.

Il se trouve également que les lombriciens, principale masse animale des terres émergées, jouent un rôle en étroite relation avec les parties abiotiques c'est-à-dire : 1) le climat qui en régule l'activité, 2) le sol qui est soumis aux actions animales physicochimiques et limite parfois ces animaux, 3) la nécromasse à la fois source de nourriture, résultante et cadre de vie. Les lombriciens interfèrent également fortement avec les composants biotiques, plantes et microorganismes, dont ils dépendent nutritionnellement et dont, en retour, ils permettent l'expansion.

Il se trouve aussi que la parcimonie, qui frise la quasi-absence, de recherches préalables écologiquement pertinentes, a obligé l'équipe à aborder concrètement, c'est-à-dire de façon vécue, de très nombreuses facettes de l'écologie car il était tout simplement impossible, faute de partenaires, de partager l'objectif de recherche global retenu.

Il se trouve enfin qu'au cours de ce quart de siècle, les diverses disciplines contribuant à l'écologie ont fort convergé en s'assignant des objectifs synthétiques (PB1, MaB, SCOPE, au plan international ; Casimir au plan national, ...) et que le laboratoire s'est résolument orienté sur un préalable méthodologique (n'est pertinent que ce qui est mesuré correctement par rapport à l'objet d'étude ; n'est constructif que ce qui est synthétisé à partir de ces mesures).

La chance veut enfin que les progrès de l'informatique, permettant ceux de la mathématique et de la logique appliquées, aient fourni le moyen de valoriser cette démarche à la fois focalisée sur les lombriciens et ouverte sur tout écosystème émergé avec contraintes anthropiques. Sinon tout serait resté pièces d'un puzzle inassemblable et objectifs de recherche utopiques.

C'est donc concrètement, à l'intérieur de cette petite équipe où les approches agronomiques, informatiques, environnementales, mathématiques et fondamentales se côtoient et interfèrent que de difficiles problèmes se posaient. Impossible de faire un modèle factuel sans critiquer les données initiales et les concepts sous-jacents à la structure du modèle. Impossible d'acquérir des données exclusivement agronomiques qui seraient tendancieuses par leur focalisation particulière : elles doivent être cohérentes avec les autres caractéristiques écologiques.

Impossible de parcelliser sur une étude prédateur-proie concrète, sans songer que la proie nourrit et transmet des polluants, sans constater que le prédateur a beaucoup moins d'impact sur la proie qu'un acte humain, tel un traitement pesticide éradiquant cette proie. Impossible de mettre en évidence une propriété au laboratoire sans évaluer sa signification dans un système écologique réel, etc.

Au terme de cet ouvrage, je rappellerai que j'ai exclu, dès l'avertissement, une approche historique de l'écologie non pas pour ignorer l'inévitable perspective temporelle liée à la formation de cette discipline, mais en raison de la difficulté de rendre exactement hommage aux devanciers dans un cadre authentiquement écologique qu'il fallait d'abord restituer et énoncer.

Science globale des organismes dans leur environnement, l'écologie est probablement consubstantielle à l'homme ; au fur et à mesure qu'il devient un peu plus "sapiens", il devient écologue. Mais c'est après le siècle des lumières, dégagant les règles scientifiques et tentant de donner de l'ordre dans la Nature (TOL'RNEFORT, JOHN Ray, LINNE, LAMARCK, LAVOISIER, ...), que la science se scindant en disciplines plus spécialisées (plus efficaces donc socialement utiles) a peut-être commencé à sentir le besoin d'une discipline propre à une perception du réel, ni microscopique, ni macroscopique, mais analysée dans une perspective synthétique. Cela fut clairement exprimé par E. HAECKEL mais, faute d'outil, ne put être développé.

Ne commettons pas ici l'erreur de croire que l'écologie a été créée par l'énoncé de sa définition, comme cela est fait par exemple par certains pédologues réduisant leur discipline à la seule cartographie des typologies édaphiques et à la première organisation énoncée et définie (Potchvovedenye, cf. DOKUCHAYEV, 1886) alors que le concept de sol vient le plus naturellement du monde sous la plume de BUFFON (1749) de Darwin (1837, terre animale), que la pédologie expérimentale remonte à au moins 11ENSEN (1879) et que les aspects morphofonctionnels sont décrits notamment par MULLER (1872, 1879).

BUFFON, admettant la génération spontanée (tout comme HAECKEL) et ignorant la thermodynamique, avait moins de difficultés pour percevoir le recyclage des éléments de la nature que nombre de nos contemporains. LAVOISIER en énonçant son célèbre "rien ne se crée, tout se transforme" donnait à la fois une méthodologie morphofonctionnelle temporospatiale et systémique à toutes réactions chimiques mais aussi *ipso facto* et "involontairement" à toute transformation. LAMARCK à la même époque énonçait pour les naturalistes un transformisme biophysicochimique touchant tant l'évolution géologique et hydrologique des paysages que celle des organismes.

Ces perspectives intellectuelles grandioses, ces idées visionnaires n'ont cependant pas infléchi la parcellisation par éclatement des disciplines scientifiques et techniques. Mal nécessaire et étape indispensable, d'autant plus inévitable que l'écologie, en tant que science, ne pouvait alors fonctionner que dans un sens : le sens analytique et réductionniste. L'absence d'outils de synthèse n'était compensée que par un discours sur la Nature, discours intéressant mais difficilement réfutable : toute tentative écologique n'étant solide qu'à son contresens, le côté analytique s'opposant au global de HAECKEL et à l'unité fonctionnelle de la Nature.

Depuis un quart de siècle l'insatisfaction intellectuelle résultant d'un succès, chaque jour plus net des méthodes d'analyses accumulant des faits, dont la cohérence nous échappe et l'insatisfaction sociale déclenchée par des applications techniques, chaque jour plus puissante, mais aussi plus aveugles et aux "justifications" exagérément sectorielles, ont conduit à deux démarches :

- essayer l'indispensable synthèse en parlant de domaines d'autant plus solides qu'ils étaient analytiques (chimie, physique, physiologie, relayée par la biochimie, ...) donc loin des systèmes réels. Loin également des disciplines plus générales confrontées au complexe et à l'hétérogène comme la botanique, l'agronomie, la zoologie, la médecine. Une fraction de la communauté scientifique a alors tenté de retourner le processus réductionniste dominant,
- rechercher *a priori* des concepts unificateurs, tel celui des transferts d'énergie-matière prôné à l'échelle mondiale transdisciplinaire par le Programme Biologique International (WORTHINGTON, 1975).

La création d'institutions, comme celle du Centre où je travaille, regroupant des chercheurs d'horizons différents, résultait alors de l'espoir que le cotoiement

"interdisciplinaire" comblerait rapidement la carence d'une science, alors inexistante. Elle a eu probablement le triple effet salulaire de :

- faire prendre conscience qu'il ne suffit pas d'additionner, ou de faire coloyer, des disciplines pour les fusionner ; bien au contraire souvent des incompréhensions patentes, mais de ce fait explicites donc correctibles, sont apparues,
- montrer qu'il n'est pas suffisant d'évoquer une théorisation écologique, d'ailleurs souvent maladroite en raison d'attaches à des disciplines particulières. Il était naturel que beaucoup, ignorant en fait la définition de l'écologie et son objet, pensent que l'approche de leur discipline était adéquate et énoncent des "lois" et des principes "écologiques" à partir d'informations beaucoup trop fragmentaires,
- faire prendre conscience aux acteurs socio-économiques que les études appliquées classiques, même bardées de chiffres et de démonstrations rigoureuses, mais myopes par spécialisation, ne répondaient pas nécessairement à l'intérêt collectif.

En résumé, nous sommes allés des multiples disciplines tant techniques que scientifiques vers l'écologie en ne l'atteignant peut-être jamais.

Il me semble qu'aujourd'hui, grâce à cet effort, l'écologie en tant que discipline propre (mais non isolée) a les moyens d'exister et peut (et doit) en retournant ce mouvement, contribuer à l'édification des disciplines connexes. Il ne s'agit plus de prouver, parce que c'est la mode, l'agronomie comme écologie appliquée niais à l'inverse que l'agronomie découvre l'écologie dans son entier pour en tirer profil dans sa pratique. Il ne faut plus faire de l'écologie végétale à partir des connaissances botaniques mais fournir à la botanique les outils de l'écologie.

Impossible de poursuivre les démarches habituelles séquentielles, dossier par dossier, et avec la primauté du schéma classique : acquisition puis interprétation et publication des résultats. Les acquis préexistants et les apports des disciplines adjacentes, enfin accessibles, deviennent plus importants que la stérile recherche d'une connaissance nouvelle que nulle synthèse, itérativement criticable, ne pourrait recevoir.

D'où la nécessité de ce livre, de la recherche d'une clarification pour une intégration de notre propre travail.

De Tinversion de la perspective

Cette intégration a conduit à constater que l'approche écologique *stricto sensu* conduit à une inversion de nos démarches habituelles.

On ne doit plus travailler à partir du particulier pour une future synthèse, aussi hypothétique qu'imaginaire, mais choisir de travailler sur des domaines focalisés à partir d'une synthèse factuelle, graduellement réalisée et validée.

Ce ne sont plus, comme durant ces trente dernières années, les disciplines qui, par un travail interdisciplinaire, espèrent atteindre à une meilleure cohérence ; c'est à l'inverse, l'écologie qui puise, dans les disciplines intersécantes à son domaine scientifique, les données et interprétations compatibles avec son domaine d'étude.

Ce n'est plus une évocation systémique qui, précédant données et synthèses (actuelles, décrit des modèles spéculatifs mais à l'inverse d'abord la gestion des données (DICs) en 8DR et les synthèses itérativement criticable en modèles factuels écologiques explicités en Système-Expert. L'approche systémique a largement devancé la gestion des données (voir Margalef, 1968 ; Cancela Da Fonseca, 1974 ; Patten, 1971, 1972) et de ce fait était condamnée au spéculatif. Aujourd'hui, à l'inverse, ce sont les modèles factuels qui nous indiquent les limites des ensembles de données et, conséquemment, les besoins de nouvelles informations.

Ce ne sont plus les masses de données acquises un peu partout, accumulées sans traitement mathématique pertinent et en attente d'une vaine "théorie écologique", mais c'est à l'inverse la carence de données réellement adéquates à l'écologie, c'est-à-dire se rapportant à une approche discriminante.

Cette recherche en écologie est simultanément finalisée car elle porte sur la compréhension de mécanismes qui sont socialement d'autant plus importants qu'ils ont trait à des échelles ni extraordinairement microscopiques, comme en physique des particules, ni remarquablement macroscopiques, comme en cosmologie, mais concrètement proximales à l'homme.

Ce n'est plus la primauté de j'analyse permettant, par une découverte de (l'infiniment petit ou de j'infiniment grand, de repousser les frontières de l'inconnu mais à l'inverse la systémique qui confronte les diverses synthèses au niveau proximal adéquat. La recherche de pointe porle(ra) sur la compréhension des systèmes écologiques en confrontant nos modèles de ces systèmes aux faits nouveaux que les systèmes réels nous fournissent.

Celte inversion a des conséquences considérables, notamment parce qu'elle n'est qu'à peine amorcée dans les faits, dans les esprits et dans nos pratiques.

Il s'agit d'abord de nous accoutumer à une démarche effectivement rigoureuse, à toutes les étapes, et ceci après une longue période où l'approximatif, le subjectif et l'empirique flou ont suppléé une écologie opérationnelle défailante. Il s'agit d'écarter une "écologie" de salon au profit d'une pratique explicite et en constante amélioration.

Les écologues continuent aujourd'hui des travaux largement disjoints, répondant à des problématiques particulières, et possèdent en commun une certaine conception de l'écologie.

Cette conception est un curieux mélange de visions synthétiques effectivement basées sur des faits et des hypothèses non réfutables mais couramment admises. Dans ce contexte encore peu formalisé, et difficilement testable, une hypothèse synthétique générale, en augmentant son audience, évolue très vite vers le fond culturel, voire le dogme, ce qui n'est pas sans danger. Ça et là, il est évident qu'une énergie considérable est perdue sur des recherches dont la problématique est inopérante. Cet état a été occulté par défaut de circulation des connaissances et par résistance épistémologique à la remise en cause de quasi-dogmes.

De sorte que l'on peut constater aujourd'hui une cohabitation d'une volonté d'intégration clairement affichée et l'existence, sous ce label, de travaux qui ne sont généralement que cohabitationnels, parfois bidisciplinaires, mais qui n'atteignent pas à cette intégration. Par exemple, il suffit de parcourir pour cela les séries de "synthèses" écologiques pour s'en convaincre. Il s'agit largement d'un héritage de la période pré-informatique ou d'informatique classique (p. 341).

Si l'on peut évoquer la nécessaire fusion des diverses disciplines, souvent cantonnées dans une approche restrictive (D1 CASTRI et HaüLEY, 1988), leurs contributions à l'écologie ne sauraient se faire par simple agrégation (p. 426). La cohérence systémique dans l'écosphère exige en effet outre l'objectivité des données (des DICs, et non un amalgame de DEPs), la scientificité (= réfutabilité des interprétations) mais aussi la connexité systémique des composants.

Encore faut-il que les disciplines soient développées de façon adéquate. Or ces développements sont très hétéroclites (de bons à nuis). Ils n'ont pas été programmés vis-à-vis des Systèmes écologiques qui les justifieraient mais en fonction de groupes de pression et de traditions historiques qui n'ont jamais pris en compte ces systèmes. <<Though interdisciplinary approaches have shown their worth, they founder easily>> (D1 CASTRI et HADLEY, 1986). La science n'a pas été programmée en fonction de l'environnement de l'homme un développement unitaire (monodisciplinaire) de l'écologie créerait les fondements nécessaires à la satisfaction des besoins environniciens actuels. Nous touchons là à la sociologie de la connaissance (Cazeneuve, 1968 ; Thuillier, 1985) qui trouverait dans la science exacte de l'entour humain, l'écologie, une base concrète dévaluation.

Si de nombreux scientifiques ou techniciens ont tenté peu ou prou, à partir de leurs disciplines ou pratiques spécialisées initiales, de tendre à l'écologie, et si quelques professeurs essaient d'amalgamer les informations concourant à cette discipline, c'est à partir d'expériences ou de spécialités particulières. C'est toujours concrètement et opérationnellement à partir de domaines nécessairement analytiques, que l'on tend *a posteriori* vers cette synthèse. C'est (souvent) le biologiste qui tend à être écologue, c'est (parfois) le physicochimiste (climatologue, pédologue, chimiste, ...) qui tend à traiter d'écologie ; c'est le spécialiste qui s'efforce d'ouvrir son domaine.

C'est le particulier vers le général. A ma connaissance, jamais l'inverse : l'écologie ne tend pas vers la chimie, la physique, la biologie, l'agronomie, la médecine. Au mieux coopère-t-elle avec ces disciplines tout en étant à la recherche de sa propre unité.

La coalescence *a posteriori* des disciplines concourant à l'écologie, leur amalgame ne peut suffire à constituer cette science pour plusieurs raisons dont deux sont essentielles :

- les propriétés d'un tout ne sont pas celles de la somme des parties,
- certaines parties contribuant à l'écologie sont sous-développées (pour ne pas dire inexistantes) et, réciproquement, d'autres sont relativement hypertrophiées ; de sorte qu'à la somme des parties manque de certains ces termes primordiaux.

Les conséquences intellectuelles de cette inversion de perspective sont multiples :

- les méthodes, terminologies et démarches ayant leur "validité", leur "reconnaissance scientifique" y compris leurs "approximations" tolérables, et donc tolérées dans un domaine circonscrit, ne sont pas *ipso facto* acceptables dans un autre domaine,
- les déséquilibres académiques des disciplines se reflètent trop fidèlement dans l'"écologie", dont les "synthèses" ne peuvent que refléter ces déséquilibres ; on ne commente que ce qui est étudié,
- certaines disciplines occupent dans l'"écologie" une place en porte-à-faux évidente. Ainsi décrète-t-on dans certaines institutions que l'écologie est une science biologique alors que d'autres n'y verrons, par exemple par le biais de l'environique, qu'un domaine juridique ou chimique ; l'intégration biophysicochimique qu'elle implique est généralement différée,
- etc.

Les conséquences sociales ou technico-économiques ne sont pas moindres.

- Au plan fondamental ne voit-on pas nombre de chercheurs se heurter aux "problèmes d'échelle" alors qu'au plan écologique ceux-ci ne peuvent exister (p. 456) ?
- Au plan fondamental ne voyons-nous pas se constituer un amalgame pseudo-scientifique qui mêle données fiables et rigoureuses, hypothèses invérifiables et conclusions incontrôlables érigées en connaissances (p. 460) ?
- Au plan appliqué ne voit-on pas journallement des "solutions" à la fois valides, dans une perception étroite, et irrationnelles, dans le domaine réel de leur application (quelques "solutions" partielles de l'eutrophisation par exemple) ?
- Au plan appliqué, ne voyons-nous pas le maintien de problèmes par l'abord de leur élude à partir du même contexte, des mêmes approches, de la même logique qui les ont créé, tels la déstructuration des sols ou le lessivage de l'azote en agronomie ?
- etc.

11 ne s'agit pas ici de blâmer telle ou telle discipline, telle ou telle technique, telle ou telle école de pensée, tel ou tel groupement d'intérêts qui ont tous leur logique propre, mais de souligner l'absolue nécessité de construire une science écologique réellement fondée, puis opérationnelle, pour résoudre les problèmes qui se posent à son niveau.

L'occultation continue de ce fait ne peut que retarder le progrès et aggraver les conséquences du retard de cette discipline essentielle à l'humanité.

A l'inverse, à partir du point de vue unitaire de l'écologie, les approches divergentes, cacophoniques, partant de préoccupations très variées, peuvent être abordées scientifiquement de façon objective et sont donc susceptibles d'une étude cohérente et rigoureuse quelle que soit l'échelle temporospatiale, mais ceci exige

1) l'adoption d'un langage exact, univoque, écologique, constituant un lien "transdisciplinaire" entre les objectifs des différents secteurs scientifiques, domaines techniques, approches socio-économiques ou choix politiques,

2) le respect impérieux de la démarche scientifique exigeant que toute interprétation puisse, et doive, être remise en cause :

2a) par un retour aux faits qui doivent donc ne pas être occultés (= être disponibles),

2b) par une critique permanente des démarches d'interprétation (par nature, créations de l'esprit),

2c) par une élimination permanente des "conclusions" fondées sur des hypothèses trop nombreuses (interprétation hors contexte, par exemple hors champ écologique, hypothèses réitérées prises pour un fait.....).

De la place de l'écologue

Ainsi le changement d'approche modifie! ra) le comportement de l'écologue.

Il est indispensable que tout chercheur écologue acquiert un savoir faire dans un domaine nécessairement limité et qu'il développe techniques, méthodes et connaissances, et sa propre expérience, vis-à-vis d'objectifs fondamentaux ou/et appliqués. Il est également indispensable que ce savoir ait une cohérence interne maximale ; c'est de sa propre responsabilité et de celle de la discipline ou interdiscipline où il se place. Mais l'écologue situera aussi systématiquement les DICs acquises dans le champ écologique et, en scientifique, les publiera sous une forme accessible (aujourd'hui en BDR).

On reconnaîtra l'écologue non pas à une absence de spécialisation, focalisée ou générale, mais au fait que le développement du savoir qu'il assure s'inscrit dès le départ comme nouvel acquis du savoir sur l'écosphère (c'est-à-dire sans renvoyer à une future intégration supposée allant de soi).

L'expérience montre que, sauf exception relevant des lois du hasard, les méthodes, techniques et souvent savoir, acquis hors de cette préoccupation ne peuvent pas s'intégrer *u posteriori* en tant que tels. Cela ne signifie pas que ce savoir n'aura aucune influence sur le développement des connaissances écologiques, mais que celle-ci ne sera qu'indirecte.

La mise à disposition des outils informatiques, essentiels pour l'écologie, modifie profondément la position des écologues appliqués ou fondamentaux.

Ils ne sont plus des spécialistes réputés compétents et tenant un discours naturaliste sur leur objet d'étude parcellisé ; ils sont des chercheurs devant exposer, de façon mutuellement explicite et critiquable, les acquis des études qu'ils ont conduits à mener dans l'objet unique de l'écologie : l'écosphère.

Ils ne sont plus des chercheurs supputant des mécanismes potentiellement en jeu dans une nature qu'ils imaginent à travers des expériences artificielles, mais des scientifiques pouvant avoir la crédibilité nécessaire par l'étude, effective et non différée de leur objet d'étude. L'importance de l'informatique en télédétection est évidente (W ALDRUP, 1984) au plan quantitatif, mais pour l'écologue, elle l'est beaucoup plus au plan qualitatif, par l'intelligence Artificielle de l'écosphère qu'elle permet.

L'écologue poursuivant des études fondamentales ou finalisées se devra dorénavant, quelle que soit son aptitude scientifique et technique spécialisée, de

satisfaire aux deux termes de la définition de E. HAECKEL : être apte à établir les relations entre les organismes et leurs milieux et contribuer concrètement, opérationnellement, à la science globale en cause. C'est-à-dire l'aptitude 1 "4) de référer les données au champ écologique et *ipso facto* les relations des organismes à leur environnement, 2") d'intervenir en expert collaborant de façon constructivement critique aux Bases de Connaissances écologiques. Les études ne peuvent être pleinement écologiques qu'à ces conditions.

Ceci ne signifie pas que tous les chercheurs sont dans la même situation et ont la même facilité à satisfaire cette double exigence écologique. Il y a des domaines où les acquis facilitent une recherche écologique, d'autres où la vacuité des connaissances, ou l'absence de moyens, est présentement réhibitoire (p. 445, 502).

Mais il y a aussi des domaines où, par nature, l'accès au Champ écologique est plus limité, par exemple en écologie microbienne où il est très difficile d'étudier en conditions écologiques satisfaisantes simultanément les organismes et leurs fonctions.

Rappelons qu'en outre l'écologue sera par ailleurs conduit dans le cadre de sa spécialité, rarement bornée au champ écologique, à effectuer également des recherches non écologiques.

Mais les études écologiques spécialisées et inscrites dans le global modifient aussi la position de l'écologue par rapport au jugement académique.

Individuellement, l'écologue (technicien, agronome, environicien, botaniste, pédologue ou zoologue) est jugé, apprécié sur la qualité spécifique de ses travaux allant de son aptitude technique spécialisée à la présentation de sa thèse établissant sa connaissance concrète et son aptitude à discourir sur un domaine restreint. Tout pousse à être un spécialiste se cantonnant dans un domaine limité ; à faire preuve d'une adéquation à l'idée que les autres se font de sa spécialité, plutôt qu'à mettre sa spécialité au service des autres.

Collectivement, socialement et concrètement, c'est l'inverse. Les difficultés accumulées depuis des décennies sont essentiellement dues à l'inaptitude d'intégrer nos actions techniques, nos interprétations particulières dans un contexte général. Les échecs accumulés finissent par condamner des domaines entiers, non pas en raison de l'absence de prouesses ou de résultats concrets dans des spécialités, mais en raison des échecs d'intégration. L'intérêt des pesticides, par exemple contre le paludisme, n'efface pas Bhopal. La dernière technique sophistiquée agricole nécessitera bien des appuis technocratiques pour être socialement tolérée... et n'évitera pas une réaction confuse en faveur de l'agriculture biologique.

L'écologue, digne de ce nom, doit être évidemment compétent dans un domaine et doit simultanément valoriser cette compétence par rapport aux systèmes écologiques ou/et socio-économiques où il s'inscrit. Il devrait être capable de prouver l'insertion de ses travaux dans des systèmes plus généraux et justifier ses recherches par rapport à ces systèmes. C'est cette efficacité à faire progresser nos connaissances qui devrait avoir primauté sur le brio du discours spéculatif attaché à des théories non testables. Alors qu'en chimie et peut-être encore plus en physique, les démarches théoriques visent essentiellement à être réfutées en définissant des modalités expérimentales concrètes, en "écologie" c'est trop souvent le charme intellectuel d'une théorie brillante qui servira de cosmétique pour masquer l'ignorance.

Cette propension à un académisme, aussi sophistiqué qu'ésotérique et abstrait, se retrouve en d'autres domaines où la spéculation intellectuelle prime anormalement sur l'efficacité de la discipline.

Alors que les écologues - qui doivent accroître leur aptitude en tant que pratique de sciences exactes sur leur objet mutuel d'étude : l'écosphère - deviennent conséquemment "statisticiens dépendants", il n'est pas intéressant de remarquer le même travers dans une discipline brillante, mais longtemps condamnée à l'ésotérisme par absence d'ordinateur.

< <... **Dans ce point de vue qui peut être étendu à toutes les méthodes statistiques faisant un usage intensif de l'ordinateur, s'enracinent pour nous, statisticiens français, à la fois une chance et une difficulté.**

Une difficulté parce que le critère majeur de l'appréciation de nos travaux est l'évaluation des constructions et des prouesses mathématiques que nous avons dû faire pour obtenir nos résultats. L'efficacité pratique de nos résultats n'est qu'un des éléments mineurs de l'appréciation. A lire les textes que nous avons cités, on verra qu'il en va autrement pour les nouvelles méthodes. Non seulement l'efficacité est un élément d'appréciation mais elle est pratiquement un élément de justification. Telle procédure de lissage local est déclarée bonne parce que l'expérience montre qu'elle est rapide et qu'elle échappe à des pièges liés à des configurations particulières des données.

Ces méthodes sont aussi une chance car elles ne peuvent exister que par une interpénétration totale de l'analyse effective des données et de la réflexion sur les méthodes adaptées à cette analyse. Pour être jugée efficace une procédure doit être effectivement utilisée sur des données réelles et c'est la constatation de sa praticabilité qui m'invitera à m'interroger sur les raisons de ses succès et de ses échecs.

Ce point de vue réordonne les aspects de notre travail. 11 ne nie pas la nécessité d'une explicitation mathématique : il en fait le langage de l'expression des propriétés de procédures informatiques que l'expérience a montré efficaces dans la satisfaction de nos seuls véritables objectifs : ceux du statisticien. > > (ESCOUE1ER, 1987).

On ne peut que constater l'identité de vue.

En conclusion, l'écologue se doit d'être 1) un bon spécialiste, au fait de sa discipline, 2) un chercheur apte, notamment par le développement de techniques d'acquisition de données objectives (DICs), à accroître la pertinence de sa spécialité, 3) un co-opérateur à la systémique générale de l'écosphère par inclusion des données et "connaissances" empiriques qu'il acquiert afin de les réfuter scientifiquement dans le système écologique où elles s'inscrivent.

De la perception, de l'écologie

< <Numeroasele implicaf-ii ale ecologiei eu dinamica societatei contemporane si ridicâ în fa fa filozofiei ^tiinjei două probleme de principu : si era și obiectul ecologiei ; paradigmele în ecologie>>. (Les nombreuses implications de l'écologie avec la dynamique sociale contemporaine soulève au plan épistémologique deux problèmes de principe : le domaine et l'objet écologique d'une part et les paradigmes écologiques d'autre part) (STUGREN, 1982a).

En l'état actuel, l'écologie apparaît à la fois comme une nécessité pour combler un vide dans l'interprétation scientifique entre cosmologie, géologie et biologie, et comme un besoin technique urgent en raison de l'impact croissant de l'homme sur son milieu circonscrit, l'écosphère : impact divers, diffus, varié et très mal interprété.

Globalement trois attitudes et situations existent dans le monde scientifique.

Premièrement une multitude d'approches spécialisées, à orientation réductionniste marquée, ont l'avantage fréquent (mais nullement obligatoire) de produire des données, concepts et démarches scientifiquement valides, mais le grave inconvénient d'être en définitive inutilisables ou très peu valorisables en raison même du caractère morcelé et pointilliste de telles approches.

Cette attitude est très dominante en raison de son applicabilité dans le court terme au micro-économique des entreprises. C'est elle qui contribue le plus au progrès concret immédiat (mise au point d'une centrale nucléaire, d'un nouveau composant d'ordinateur, d'un médicament, d'un pesticide, d'une carte thématique pour le drainage des sols, ...). C'est elle aussi, *ipso facto*, qui entraîne le plus de risques par l'absence d'intégration des appréciations et par leur développement prépondérant, résultant du succès même de ces applications techniques. Nous sommes obligés

d'admettre à ce niveau que nos appréciations ne s'intègrent pas et sont donc partiales parce que partielles.

Deuxièmement, par réaction, parfois par goût intellectuel, une altitude opposée s'efforce de dépasser cette situation en se plaçant d'emblée sur un plan holistique. Les idées théoriques générales (et souvent généreuses) sont alors le moteur de "théories des systèmes", de théories hiérarchiques et de modélisations pseudo-concrètes.

Cette approche constate la dégradation de la biosphère, la montée croissante des nuisances, la vague démographique mondiale, les pertes de sols cultivables, la modification des propriétés de l'atmosphère. Ces faits scientifiques globaux, ces démarches théoriques logiques incorporent très peu, et toujours de façon anecdotique, les études particulières. Celles-ci ne sont indiquées qu'à titre d'exemple, par les facteurs dégradatifs particuliers, potentiellement généraux, mais dont la généralité n'est nullement démontrée ni souvent concrètement inductible.

Quant aux équations générales, elles sont peu ou pas documentées, par des mesures concrètes. Quant aux systèmes globaux décrits, ils sont plus "acceptés" par commodité et surtout faute de mieux.

En dépit de notre désir de connaître comment l'écosphère réagit aux actions perturbantes humaines, nous sommes obligés d'admettre que ni les risques, ni les causes, ni les conséquences de ces changements ne sont actuellement rigoureusement appréciés.

La troisième tendance est à la frontière du monde scientifique. Elle est basée sur un empirisme, qui a jadis fait ses preuves lorsque l'homme était le plus souvent impuissant face à la nature, c'est-à-dire aux régulations systémiques de l'écosphère. Elle est souvent celle des techniciens d'applications et des scientifiques travaillant, à des recherches finalisées. Ici la rigueur s'efface devant le discours ; ("évidence" et la supputation tendent à suppléer la carence résultant des deux attitudes scientifiques décrites ci-dessus. L'urgence sociale, la nécessité économique, les contradictions politiques pèsent alors plus ou moins fort sur un discours naturaliste, une pratique agricole ou industrielle, une prise de conscience écologiste ou une motivation commerciale.

L'écologie, avant même d'avoir constitué un corps de doctrine qui lui soit propre (c'est-à-dire ni physique, ni chimique, ni biologique, mais biophysicochimique), d'avoir créé ses outils et méthodes (notamment l'intégration effectivement réfutable des acquis des spécialistes dans des modèles factuels couvrant tout le champ écologique de l'écosphère) a été appropriée par ces trois tendances. Cette appropriation a concouru à l'émergence de l'écologie moderne mais aussi à son incohérence reflétant les limitations de ces trois attitudes. D'où l'appel de MACFADYEN (1978) <<**This may not sound too difficult but we Ecologists have further special problems. The very word ECOLOGY has been greatly changed and sometimes degraded over recent years. To many people it is an emotive word with "good" or "bad" implications, a label for political dogma and far from the scientific discipline which was Ecology in the first half of this century. I believe it is the duty of all ecologists to maintain the scientific integrity of our subject.**>>

C'est pourquoi tout au long de cet ouvrage, débutant par un appel à la rigueur, la primauté a porté sur l'identité effective (et non morcelée) de l'objet d'étude, sur la méthodologie écologique qui fondamentalement ne présente plus de difficultés d'échelles, de conception ou d'appréciation de l'état des connaissances écologiques.

S'il n'y a plus de difficulté fondamentale au développement de l'écologie, il y a par contre, en raison même des acquis qu'elle requiert et de son ouverture sur la

communauté scientifique, un lourd héritage pesant sur ce développement. Sa mise en oeuvre exige données concrètes et ouverture sociale, ce qui obère fortement ses applications. 11 ne suffit donc pas de pouvoir potentiellement mais de vouloir concrètement et ceci implique une analyse attentive des difficultés.

Au nombre de celles-ci, l'inertie intellectuelle, la résistance épistémologique, prennent de nombreuses formes, y compris lors du choix d'une approche nouvelle, soit théorique, soit technique.

Le succès d'une "théorie écologique" ou d'un "outil de traitement biométrique" est présentement proportionnel, non pas à son intérêt en écologie générale ou appliquée, mais à l'importance de la communauté humaine (sous-ensemble) susceptible de l'utiliser. Qu'une façon nouvelle de présenter des résultats anciens soit proposée, y compris dans le style ["stratégie r" en écobioécologie au lieu de "prolifique"! et le succès est rapide, (le succès d'une novation-mode sera aussi fonction de sa simplicité (plus la novation est faible, plus elle est aisément comprise et donc adoptée) et de la revalorisation des acquis antérieurs quelle permet, par exemple auprès de l'imposante communauté ayant des masses de données sur les populations animales ou végétales.

Ainsi "l'importance" des travaux pour utiliser ou développer tel ou tel domaine est-elle non pas dépendante d'un cadrage d'après une perspective générale, permettant d'évaluer ces recherches par rapport aux méconnaissances fondamentales sur l'écosphère ou d'objectifs économiques, mais en fonction d'un succès médiatique : c'est l'importance mesurée à l'applaudimètre.

Mais les difficultés sont également d'ordre épistémologique en ce sens que l'écologie porte souvent sur des objets familiers ayant fait l'objet d'approches scientifiques ou techniques partielles donc écologiquement inadéquates mais imposées fortement comme références "scientifiques" classiques.

L'adoption d'une systémique discriminante, s'adaptant rigoureusement à la discipline, donc à sa cohérence devrait permettre de lever cet handicap.

Elle exige toutefois un langage commun (cf. lexique, P. 564) dont l'importance doit être soulignée. LEGAY en 1987 n'écrit-il pas, sur le seul plan de la sémantique des études de populations : **<<Les forestiers, les rnammalogistes, et bien d'autres, doivent abandonner ce qui, dans leur langage est présicientifique, et ne constitue qu'un argot de clan. Il est d'autant plus nécessaire d'y voir clair que notre discipline citabilil de plus en plus de relations extérieures et que nos interlocuteurs doivent nous comprendre>>.**

Rigueur n'est toutefois pas rigidité. Alors que les physiciens ont dû s'affranchir des représentations familières (newtoniennes) des phénomènes, nous devons, non pas éliminer les concepts usuels, mais plutôt les sélectionner pour réduire la pléthore terminologique qui y est associée et les classer selon leur importance dans les systèmes écologiques. Ainsi la gestion du domaine des connaissances écologiques devrait peu à peu nous permettre une tomographie de l'espace où nous sommes, car écologiquement nous sommes dans l'objet d'étude à représenter synthétiquement.

Nos moyens d'appréciation de notre action sur notre environnement ont été tronqués, à la fois techniquement et conceptuellement, en raison des limitations de notre perception, en un kaléidoscope de pièces d'un puzzle incomplet.

On peut continuer à décider d'agir sur notre milieu, d'utiliser des outils de plus en plus puissants (= perturbants) en ne tenant pas compte sérieusement de notre environnement immédiat alors que ceci vient de devenir possible. Est-ce souhaitable ?

De la situation de l'écologie

En écrivant ces dernières lignes, revenons un bref instant sur l'objectif de cet ouvrage énoncé dès l'avertissement. Il était exclu de résumer l'écologie ; une vaste bibliothèque n'y suffirait pas. Était également exclue la présentation d'un pointillisme de telle ou telle spécialité, ayant trait à l'écologie. La position intermédiaire, où se place nécessairement un auteur écrivant un livre de volume modeste, est inconfortable. Elle ne peut, et elle n'a pas d'ailleurs, vraiment chercher à éliminer les effets de la spécialisation de celui-ci (p. 563). Mais l'objectif était ailleurs : montrer la faisabilité d'une écologie réellement scientifique ; montrer que tout un pan de la perception humaine sur l'environnement - celui des systèmes écologiques - longtemps voués au discours naturaliste, écologiste ou spéculatif, pouvait entrer de plain pied dans une démarche entièrement logique et réfutable, c'est-à-dire dans le domaine des sciences exactes et des techniques testables.

Certes, dans ce livre, les exemples choisis et les démonstrations effectuées ne peuvent en aucun cas être considérées comme particulièrement heureux ou pertinents ; les moyens limités de l'auteur ne peuvent suppléer à un nécessaire recul, à une critique que seul le temps pourra établir.

Pris isolément, l'écologue, donc l'auteur, ne peut être opérationnel - collectivement il ne peut encore l'être, si les modalités opérationnelles de sa contribution à l'écologie lui échappent.

Limité par cette contrainte, j'espère néanmoins avoir montré que de telles modalités existent ; elles sont même en très rapide développement - hors de l'écologie pour l'essentiel avec la logique opérationnelle des logiciels - car la nécessité de surmonter le complexe n'est pas propre à l'écologie. Mais il revient à l'écologue d'écarter les faux semblants pour se consacrer à sa discipline.

C'est cet essai sur la faisabilité d'une élaboration permanente d'une écologie unitaire, restaurée dans son sens exact authentiquement scientifique, et donc socialement utile, que j'ai tenté dans cet ouvrage.

On a demandé aux écologues - et on le fait encore quelque peu - de résoudre les problèmes de société résultant de la montée en puissance de l'homme comme acteur sur son propre environnement. D'abord diffuse, cette demande est devenue pressante depuis les années soixante et incontestablement, dans la majorité des cas, l'écologie n'a pu répondre - cela pour des raisons quantitatives évidentes dans certains pays comme la France (c/i ANONYME, 1981, Di CASTRI, 1984 ; HENRY, 1984) << **C'est la mode et le besoin de l'Écologie en 1970 qui, en introduisant le concept d'environnement, ont développé une forme parallèle, l'écologisme. En retour, l'écologisme a exercé une pression de plus en plus forte sur les décisions, au niveau politique, ce qui a motivé une demande plus ou moins bien exprimée et croissante au niveau des chercheurs. Une certaine confusion des idées, aboutissant à tout classer dans "l'écologie" ou "l'environnement", la mode mêlée aux nécessités ressenties plus ou moins clairement, les intérêts qui se rattachent à bien des projets d'aménagement et d'exploitation des ressources, créent un bouillonnement dont il n'est pas toujours aisé de sortir des actions spécifiques à l'écologie**>> (RICOU, 1981). Plus généralement, l'écologie n'a pu répondre également pour des raisons qualitatives tenant à son inexistence en tant que science unitaire opérationnelle.

L'écologie n'a été dans la plupart des pays qu'un point de ralliement entre naturalistes, amoureux de la nature, écologistes inquiets des techniques non justifiées, et certains biologistes. Ce fut également un point commun de rassemblement de nombreux spécialistes - surtout biologistes - dans le cadre du Programme Biologique International. Ce fut enfin, le temps d'une mode, un logo que nombre d'agronomes, de biologistes, de chimistes ou de physiciens opportunistes utilisèrent, le courant étant "porteur".

Après ce flux, c'est le reflux.

< < U me semble incontestable que dans la plupart des pays, et surtout des pays industrialisés occidentaux, l'écologie est dans une situation de crise ; s'il s'agit d'une crise réelle ou d'une crise perçue en tant que telle, s'il s'agit d'une crise de dégénérescence ou d'une crise de croissance (la "déstabilisation créatrice") il est impossible de l'anticiper.

Cette crise se manifeste par des symptômes qui peuvent paraître très contradictoires : d'une part, le foisonnement des activités en écologie, la plus grande disponibilité de fonds pour la recherche écologique et la prise en compte par l'opinion publique et par les hommes politiques de ce qu'est l'écologie (ou plus souvent, de ce qu'ils croient - de manière parfois erronée - être l'écologie).

D'autre part, et dans le sens contraire, le fait que des recherches définies comme portant sur l'écologie sont tellement différentes et hétérogènes qu'il est difficile de comprendre les liens épistémologiques qui les unissent. Ces recherches ont parfois une hypothèse de travail confuse, une méthodologie peut appropriée et, pour vouloir répondre à trop de questions à la fois, n'arrivent à dégager ni une problématique scientifique attrayante ni des applications pratiques réelles. Il en découle trop souvent une perte de crédibilité de l'écologie, aussi bien auprès du reste de la communauté scientifique que des administrateurs et des hommes politiques > > (Di CASTRI, 1985).

C'est au moment où, grâce au travail accompli durant ces dernières décennies, et grâce aux progrès concomitants de l'intelligence Artificielle permettant une maîtrise opérationnelle du complexe - c'est au moment où l'écologie peut devenir opérationnelle et répondre à son objet en assurant ses assises fondamentales unitaires et en permettant sa pleine applicabilité - que l'on assiste à un paradoxe : celui d'un certain désengagement social et scientifique vis-à-vis de cette science.

Souvent livré à lui-même, jugé à partir des seules approches réductionnistes, pressé de faire individuellement la preuve de la qualité d'un travail qui ne peut être jugé que dans un cadre collectif - dont la nécessaire valorisation intégratrice n'existe pas encore - le chercheur écologue se décourage. Il préfère trop souvent désertier ce terrain hostile pour se réfugier dans le confort des disciplines anciennes, reconnues, ayant groupes de pression et structures d'accueil et une masse critique suffisante pour s'adapter - au prix de ravalements de façade - aux aléas des pressions socio-économiques.

Nombre de décideurs, hommes politiques ou responsables, n'ont perçu de l'écologie que l'écologisme, qui lui est conceptuellement, mais non thématiquement, étranger. Désapprouvant le mouvement contestataire sinon formellement du moins psychologiquement, ils ont coupé les crédits de la "biologie" (sic) ayant trait à ce domaine flou et, il faut le reconnaître, souvent ambigu.

Les opportunistes ayant créé le flux accompagnent le reflux et abandonnent le label pour se réfugier dans des domaines supposés plus scientifiques en revenant à des discours sectoriels, il est vrai plus faciles.

Corrélativement, le décideur socio-économique ne fait plus crédit à une science qui répond si rarement à son attente, ce qui d'une certaine façon est sain. Plus grave il ne perçoit plus le besoin de créer des équipes et une recherche fondamentale, qui, il est vrai, ne s'exprime pratiquement plus en tant que telle, tant son existence est fragile.

< <11 n'est ni possible ni souhaitable d'envisager ce que pourrait être l'écologie d'ici à la fin du siècle, sans se tourner vers le passé, vers les origines mêmes de l'écologie, vers son émergence en tant que science et vers sa confrontation avec la crise de l'environnement en tant que phénomène économique et socio-culturel.

(Jet aperçu historique est d'autant plus nécessaire que trois aspects font surtout défaut dans la plupart des recherches et des programmes écologiques actuels : l'évaluation objective et "transparente", le réalisme entre les possibilités réelles en chercheurs et en moyens et les objectifs de la recherche, ainsi que la "mémoire" de ce qui a déjà été réalisé dans un passé plus ou moins récent. De ce fait, on constate la "fuite en avant" sans contrôle de certains programmes nationaux ou internationaux,

la multiplicité et la dispersion de projets qui ne pourront pas aboutir à grand chose du fait de leurs objectifs trop ambitieux voire utopiques, et la répétition de recherches ou d'approches qui ont déjà été développées sans grandes différences même trente ans auparavant>> (D1 CASTRI, 1985).

L'écologie, longtemps privée de moyens physiques, financiers et humains, n'a pas pu établir à temps une base scientifique rigoureuse. L'époque médiatique, favorable aux modes, l'a, en raison du besoin social d'une telle science, élevée prématurément au pinacle de façon abusive et caricaturale... Et puis ce fut la réaction, le retour de balancier ; déçu de son caractère peu opérationnel, il est de bon ton d'en minimiser l'importance.

Pris entre d'une part un développement insuffisant, des moyens techniques, intellectuels et humains inadéquats, et d'autre part une demande sociale pressante, pouvait-il en être autrement ?

Toujours est-il que la demande sociale et économique perdure et que le développement de la science globale permettant l'étude des organismes dans leur environnement reste et restera une nécessité déterminante. C'est inévitabile.

Les problèmes, issus du développement des nombreux outils que l'homme prétend mettre en œuvre sur et dans le système écologique auquel il appartient, continuent de s'accumuler. Leur énumération, des produits cancérogènes, radioactifs, à la dégradation de nos sols et plus générale, de nos milieux, est à la fois inutile et banalisée, mais constitue une catastrophe permanente (voir RAMADE, 1987). Les décideurs doivent pendant ce temps continuer de décider en aveugles, position inconfortable qu'ils expriment souvent.

< < En dépit de la crise actuelle, ou peut-être grâce à cette même crise qui pourrait servir à se remettre en question et à déclencher des problématiques nouvelles. Je crois fermement que l'écologie vers les années '90 pourrait assumer quatre rôles fondamentaux : carrefour entre les sciences biologiques et les sciences socio-économiques, carrefour entre les sciences biologiques et les sciences physiques, facteur de développement de grande importance surtout pour la coopération avec le Tiers-Monde, et finalement science dotée d'une unité et d'une logique propre >> (D1 CASTRI, 1985).

Pour une écologie renouvelée

Pour de nombreuses raisons, la nécessité d'une discipline écologique a été perçue très tôt : les accidents techniques et désirs sociaux en font une aspiration généralisée. Pour autant, ceci n'implique nullement que cette science globale existe en tant que telle, que son objet soit réellement reconnu, quelle possède une unité, une méthodologie, un (ou des) paradigme(s) et des moyens à hauteur de sa nécessité **sociale, bref, qu'elle soit opérationnelle**. **< ...si l'écologie veut donner son approche à d'autres disciplines, il faut, avant tout, qu'elle s'affirme comme une science bien définie, avec sa propre doctrine, son identité et ses méthodes. >> (D1 CASTRI, 1985).**

Au cours de cet essai, j'espère avoir montré que l'identité pré-existait et que les techniques et démarches nécessaires sont dorénavant disponibles, celles-ci étant complétées par les apports traditionnels de la physique, la biologie et la chimie, dont les acquis doivent être réinterprétés et replacés dans le champ écologique.

L'écologie est opérationnelle - même si l'illustration qu'en donne cet ouvrage est restreinte à la démarche, anormalement quasi individuelle, d'un auteur, elle s'inscrit dans un contexte infiniment plus riche.

L'écologie a son domaine, des bases fondamentales solides et généralisées, confortées par les sciences exactes classiques (1ère Partie) ; son développement, qui

reste largement à réaliser, peut aujourd'hui atteindre sans délai une grande rigueur grâce à une élaboration précise et efficace (2ème Partie), enfin ses nécessaires applications, longtemps différées par impuissance, la rendent d'autant plus précieuse qu'elle est potentiellement opérationnelle (3ème Partie).

Si les écologues ont, ces dernières années, souvent affirmé avec force l'importance de la science qu'ils pratiquaient et son rôle social, ils ont peu précisé comment cette discipline opère et devait assurer son développement et ses fonctions.

L'écologie a besoin d'être affirmée comme science unitaire. Elle n'est pas la biologie + la pédologie + la climatologie + un soupçon de chimie ou de physique. Celle soupe n'est qu'une somme d'ingrédients disparates acquis pour d'autres objectifs : les pièces du puzzle sont inharmoniques et beaucoup manquent.

Elle est l'écologie, observant dans le champ écologique les états ou cinèses biophysicochimiques et les interprétant sans élucubrations.

Mais l'écologie rénovée doit essentiellement être opérationnelle.

La nature profonde de l'écologie n'oblige pas de façon aussi essentielle que, par exemple en physique nucléaire ou en biologie moléculaire, au développement de techniques analytiques nouvelles. De nombreuses disciplines sont essentiellement dépendantes de leurs outils d'analyse exploratoire. Ce n'est pas essentiellement le cas de l'écologie qui s'appuie pour ses données analytiques sur le développement des diverses sciences biophysicochimiques. Il faut toutefois préciser ici que l'exploration des systèmes écologiques réels nécessite le développement d'un génie écologique spécifique actuellement quasi inexistant.

Par contre, sa nature globale exigeait des moyens techniques de synthèse, portant sur des données se rapportant à tout ou partie de son objet d'étude, l'écosphère.

Les dernières difficultés d'ordre technique sont en train de s'effacer. Les SGDB(R) et la systémique écologique en Intelligence Artificielle y jouent le même rôle que celui de la chromatographie dans l'essor de la biochimie. Les Bases de Connaissances (et leurs Systèmes-Experts) permettent des heuristiques confrontables explicitement aux faits. L'écologie a longtemps été dans une situation analogue à celle d'une physique nucléaire sans accélérateurs de particules : cela n'est plus vrai.

Si les difficultés actuelles peuvent s'expliquer pour des raisons historiques évidentes ; différer l'émergence de l'écologie, qui a aujourd'hui potentiellement son domaine, ses méthodes et ses moyens, est, tant culturellement que socio-économiquement, impardonnable.

Restent à mesurer les étapes concrètes pour la valorisation réelle d'une telle écologie opérationnelle. Les difficultés semblent aujourd'hui nettement plus d'ordre conjoncturel que scientifique et technique, ce qui n'en limite pas l'importance.

Il peut y avoir trois difficultés :

- l'une propre au développement de l'écologie, n'ayant pas atteint une maturité suffisante. Celle-ci est conjoncturelle et, peut être écartée : l'écologie est fondée sur les sciences exactes et est devenue aujourd'hui opérationnelle : cela ne peut plus être un frein,
- l'une propre aux écologues qui, par inertie ou réductionnisme-isolement de spécialiste, ignorerait l'unicité opérationnelle de cette discipline. Cette résistance épistémologique est évidemment possible,
- l'une propre à la société qui, en refusant l'investissement en hommes et en moyens, se refuse à développer la science dont elle a un urgent besoin.

Mais fondamentalement assise sur des données des trois sciences exactes (physique, chimie, biologie), elle est elle-même une science exacte et, preuve étant faite de son efficacité interne (= validité opérationnelle et scientificité des écologues), devrait jouer un rôle social clé dans l'"économie du savoir".

<<Au moins en première approximation, on peut supposer qu'il y a une "économie du savoir" mettant en jeu une riche diversité d'offres et de demandes. En fonction des besoins économiques, politiques et culturels, en fonction aussi de l'état des techniques et de l'outillage mental, la nature et la hiérarchie des savoirs évoluent. Certains savoirs apparaissent comme dominants, à une époque donnée, alors que d'autres sont secondaires, parallèles ou marginiaux. La tâche idéale de la "sociologie de la connaissance" serait de fournir un cadre théorique tout à fait général permettant de dévoiler les divers intérêts en jeu, l'enchevêtrement des thèmes épistémologiques et extra-épistémologiques, les "causes" et les "effets" de toutes les innovations concernant d'une façon ou d'une autre les activités cognitives> > (Thuillier, 1985).

On peut encore penser de l'extérieur mais aussi, pour nombre d'écologues actuels, de l'intérieur, que d'importantes difficultés fondamentales limitent le développement de l'écologie.

Celles-ci sont effectivement fréquemment mentionnées car elles constituent un frein à de nombreuses élaborations écologiques au cours de débats souvent peu constructifs. Elles ont été énoncées au paragraphe 7.3.5. Elles s'avèrent, à ma connaissance et sans exception, relever de l'absence de rigueur conceptuelle, de la carence de cohérence ou d'un laxisme "scientifique".

Si l'écologie n'a pas eu pendant longtemps les moyens de son ambition, l'émergence d'une écologie monodisciplinaire, réellement unitaire et disposant d'outils aujourd'hui opérationnels, tant d'analyse que de synthèse, rend anachronique ces débats qui témoignent avant tout de la carence de formation écologique.

Si ce n'est l'affligeant sous-développement de la discipline tant quantitativement que qualitativement, aucune raison objective ne peut aujourd'hui limiter son usage. Son sous-développement a des conséquences désastreuses au plan économique et social dont l'ampleur est si étendue qu'elle est littéralement incommensurable.

Alors que l'on s'émerveille des progrès de la Science vers l'infiniment grand ou l'infiniment petit, nous ne sommes pas capables de connaître notre environnement immédiat donc de maîtriser les conséquences de nos actes sur notre milieu proximal.

Les écologues ont longtemps déploré la carence de prise en compte de leur discipline ; leur conscience de sa nécessité les motivait ; ses faiblesses les discréditaient. L'écologie a atteint aujourd'hui l'âge adulte où elle peut reconnaître ses tares et carences. Disposant enfin d'outils techniques et de démarches indispensables à son élaboration, elle peut reprendre son projet sur une base assainie, sans farder par quelques artifices la situation, il est vrai embryonnaire, où se trouve son développement.

Malgré les insuffisances historiques de celle-ci, on peut dire qu'aujourd'hui cette science est enfin pleinement opérationnelle. Les problèmes intrinsèques à l'écologie sont levés. En conséquence : les problèmes seront dorénavant seulement extrinsèques. **La responsabilité des perles incommensurables, résultant de sa non utilisation, relève maintenant seulement de la responsabilité des décideurs régulant nos actes sur notre Ecosphère.**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACKERMAN, T.P., & W.P. CROPPER .Jr, 1988 • Scaling global climate projections to local biological assessments. *Environment*, 30, 5, 31-34.
- A.E., 1972 - Alpha encyclopédie. Ed. Grange batelière, Paris, 1-6240.
- AKIYAMA, T., S. TAKAHASHI, M. SHIYOMI & T. OKUBO, 1984 • Energy flow at the producer level. The energy dynamics of grazed grassland 1. *Oikos*, 42, 129-137.
- AL ADDAN, F., 1990 - Biophysique du sol : étude quantitative des relations entre le travail lombricien et des propriétés de sols méditerranéens. Thèse d'Université, Montpellier (soumise).
- AL ADDAN, F., R. ALIAGA & M.B. BOUCHE, sous presse - Relations entre peuplements lombriciens et propriétés physicochimiques de sols méditerranéens. C.R. X Coll. int. zool. sol, Bangalore, Inde.
- ALBERTS, B., D. BRAY, J. LEWIS, M. RAFF, K. ROBERTS & J.P. WATSON, 1983 - Molecular biology of the cell. Garland publ. inc., New-York, 1-1146.
- ALBRECHT, A., 1984 - Rôles des Enchytraeides dans l'agrégation et l'humification d'humus de type moder de l'Est de la France. Thèse doct. 3ème cycle, Univ. Nancy I, 1-99.
- ALLEGRE, C., 1983 - L'écume de la terre. Ed. Fayard, Paris, 1-366.
- ALLEN, T.F.H., & T.B. STARR, 1982 - Hierarchy, perspectives for ecological complexity. Ed. univ. Chicago press., Chicago, 1-310.
- ANDERSON, J.M., & J.S.I. INGRAM, 1989 - Tropical soil biology and fertility : a handbook of methods. Ed. CAB international, Wallingford, U.K., 1-171.
- ANDRE, F., 1963 - Contribution à l'analyse expérimentale de la reproduction des lombriciens. *Bull. biol. Fr. Belg.*, 81, 1, 1-101.
- ANDRO, T., J. BACHACOU, P. DELHOTAL, J.C. FAYET, J. LE RENARD, J.-P. RELLIER, C. THIOLON & V. WAHL, 1988 - SEP : un ensemble de Systèmes Experts pour l'aide au diagnostic des maladies des plantes cultivées en France. In proc. VIIth int. workshop "Expert Systems and their applications" (Avignon, France, 13-15/05/87), 173-186.
- Anonyme, 1974 - Memento de l'agronome. Ed. Min. de la Coopération, Paris, 1-1591.
- Anonyme, 1979 - Les chiffres clés de l'énergie. Ed. Minis, industrie, 1-134.
- Anonyme, 1981 - Ecologie et développement. Ed. CNRS (ISBN 2-222-02778-0) et INRA (ISBN 2-85340-325-4), Paris, 1-468.
- Anonyme, 1986a - Science et société ; la qualité de l'eau. *Pour la science*, 101, 8-9.
- Anonyme, 1986b - Une nouvelle conception de la gestion de l'espace rural (zone d'exploitation intensive et zone de déprise). Rapport Haut comité environnement, 1-10.
- Anonyme, 1987a ■ Effets des pesticides sur la faune et la flore sauvages. Appel d'offre, Min. dél. charg. environ., SRETIE, EGPN (3/09/87), 1-2.
- Anonyme, 1987b - Regulating pesticides in food. *US acad. sci. Washington D.C.* (cité par BOUGUERRA, 1987).
- ASTRAHAN, & al., 1981 - cité in DELOBEL & ADIBA, voir IBM, 1981.
- ATHIAS-HENRIOT, C., 1977 - Contribution à l'écologie des pédogamnes de France tempérée (Parasitiformes, Gamasides). 1. Méthodes d'interprétation des échantillons. *Bull. sci. Bourgogne*, 30, 43-70.
- AUERBACH, S.L, J.S. OLSON & H.D. WALLER, 1964 - Landscape investigations using cesium-137. *Nature*, 201, 761-764.
- AUSSENAC, G., 1980 - Le cycle hydrologique en forêt. In P. Pesson (dir.) "Actualités d'écologie forestière", éd. Gauthier-Villars, Paris, 283-307.
- AVEL, M., 1929 - Recherches expérimentales sur les caractères sexuels somatiques des Lombriciens. *Bull. biol. Fr. Belg.*, 63, 149-318.
- BALENT, G., 1987 - Structure, fonctionnement et évolution d'un système pastoral. Le pâturage vu comme un facteur écologique piloté dans les Pyrénées centrales. Thèse science Univ. Rennes I, 18/12/87, 1-192.

- BALOGH, J., 1958 - Lebensgemeinschaften der Landtiere. Ed. Akademiai Kiado, Budapest, 1-560.
- BALUEV, V.K., 1950 - (Les lombriciens, cause des différences pédologiques dans la région d'Ivanovo) (en russe). *Pochvovedenye*, 4, 372-385.
- BARBAULT, R., 1987 - Peut-on parler de sélection-r et de sélection-K. In J.M. Legay (red) "Biologie des populations", éd. IASBSE, Univ. Claude Bernard Lyon, 11-17.
- BARBAULT, R., P. BLANDIN & J.A. MEYER, 1980 - Avant-propos, in R. Barbault, P. Blandin et J.A. Meyer (reds) "Recherches d'écologie théorique", éd. Maloine S.A., Paris, VI-VII.
- BARGHOORN, E.S., & J.W. SCHOPF, 1966 - Microorganisms three billion years old from the precambrian of South Africa. *Science*, 152, 758-763.
- BAROIS, L., & P. LAVELLE, 1986 ■ Changes in respiration rates and some physicochemical properties of a tropical soil during transit through *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae, Oligochaeta). *Soil Biol. Biochem.*, 18, 5, 539-541.
- BAROSS, J.A., & J.W. DEMING, 1983 - Growth of "black smoker" bacteria at temperatures of at least 250°C. *Nature*, 303, 423-426.
- BARTOLI, F., & B. SOUCHIER, 1978 - Cycle et rôle du silicium d'origine végétale dans les écosystèmes forestiers tempérés. *Ann. sci. forest.*, 35, 187-202.
- BENZECRI, J.P., 1973 - La classification dans les sciences de la nature. *Rev. stat. appl.*, 21, 5, 5-32.
- BENZECRI, J.P., & F. BENZECCI, 1980 - Pratique de l'analyse des données. Analyse des correspondances, exposé élémentaire. Ed. Dunod, Paris, 1-424.
- BERLESE, A., 1905 - Apparachio per raccogliere presto ed in gran numero piccoli artropodi. *Redia*, 2, 85-89.
- BERNARD, C., 1856 - Introduction à l'étude de la médecine expérimentale. Ré-édition Pierre Belfond, Paris, "poche club", 18, 1-378 (1966).
- BERTALANFFY, von L., 1968 - General system theory. Trad. Théorie générale des systèmes. Ed. Dunod, Paris (1972), 1-296.
- BERTELLIN, J., & F. TOUTAIN, 1979 - Biologie des sols, in Bonneau et Souchier (dir.), éd. Masson, Paris, 123-160.
- BERTILLON, A., Dr, 1860 - Revue de biologie. *Presse sci. deux mondes*, 1, 1, 119-131.
- BERTILLON, A., Dr, 1873 - Mésologie. In A. Dechambre (dir.) "Dictionnaire encyclopédique des sciences médicales", éd. G. Masson et P. Asselin, Paris, 21 1-266.
- BETSCH, J.-M., & J.-P. CANCELA DA FONSECA, 1984 - The significance of species diversity in tropical forest ecosystems. *Biol. ini., spec.* issue 6, 30-44.
- BLANDIN, P., 1986 - Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques. *Bull. écol.*, 17, 4, 215-307.
- BLONDEL, J., 1979 - Biogéographie et écologie. Ed. Masson, Paris, coll. écologie, 15, 1-173.
- BLONDEL, J., 1987a - Vers une approche intégrée de la biologie des populations des mésanges. In J.M. LEGAY (red) "Biologie des populations", éd. IASBBSE, Univ. Claude Bernard Lyon, 25-33.
- BLONDEL, J., 1987b - Biogéographie évolutive. Ed. Masson, Paris, coll. écol., 20, 1-221.
- BOLIN, B., 1981 - Carbon cycle modelling. Ed. John Wiley, Chichester, 1-390.
- BOLIN, B., 1982 - Changing global biogeochemistry. In P.W. Brewer (ed) "Oceanography, the present and future". Springer-Verlag, New York, 305-326.
- BOLTZMANN, L., 1898 - Vorlesungen über Gastheorie. II. Teil. Ed. Barth Verlag, Leipzig (Trad. française : 1902 - Leçons sur la théorie des gaz. Ed. Gauthier-Villars) (cité par TONNELAT, 1977).
- BONNEAU, M., 1985 - Le "nouveau dépérissement" des forêts, symptômes, causes possibles, importance éventuelle de la nature des sols. *Sci. sol*, 4, 239-249.
- BONNY, S., & Y. LE PAPE, 1984 - "L'agriculture biologique", quelques éléments de sa viabilité et reproductibilité. *Bull. teeh. inform.*, 386, 17-38.
- BORNEBUSCH, C.H., 1930 - The fauna of forest soil. *Pet. Forstige Forsogsvasen*, 11, 1-158.
- BOSSATA, E., & H. STAAR, 1982 - The control nitrogen turn-over in forest litter. *Oikos*, 39, 143-151.
- BOTNARIUC, N., 1963 - La question des prétendues hyperthélies. *Trav. museum Gr. Antipai, Bucuresti*, 4, 47-710.

- BOTTNER, P., & G. BILLES, 1987 ■ La rhizosphere : site d'interactions biologiques. Rev. écol. biol. sol, 24, 3, 369-388.
- BOUCHE, M.B., 1970 ■ Remarques sur quelques Lumbricina de France et conséquences de la découverte de nouveaux taxons Vignysinae (subfam. nov.) et Diporodrilidae (fam. nov.), Pedobiologia, 10, 4, 246-256.
- BOUCHE, M.B., 1971 - Relation entre les structures spatiales et fonctionnelles des écosystèmes illustrées par le rôle pédobiologique des vers de terre. In Person "La vie dans les sols", éd. Gauthier-Villars, 187-209.
- BOUCHE, M.B., 1972 - Lombriciens de France. Ecologie et systématique. Ed. INRA, Ann. zool. - Ecol. anim., n° spéc., 72-2, 1-671.
- BOUCHE, M.B., 1975 - Discussions d'écologie 1. Introduction. II. Obtention de données écologiques et uniformisation spatiale. Bull. écol., 6, 1, 23-32.
- BOUCHE, M.B., 1976 - Etude de l'activité des invertébrés épigés prairiaux. 1. Résultats généraux et géodrilologiques (Lumbricidae : Oligochaeta). Rev. écol. biol. sol, 13, 2, 261-284.
- BOUCHE, M.B., 1977a - Ecologie ou paraécologie ; peut-on estimer la contribution de la faune du sol aux cycles des éléments biogènes ? In U. Lohm et T. Persson "Soil organisms as components of ecosystems". Ecol. bull. (Stockholm), 25, 157-163.
- BOUCHE, M.B., 1977b - Stratégies lombriciennes. In U. Lohm et T. Persson "Soil organisms as components of ecosystems". Ecol. Bull (Stockholm), 25, 157-163.
- BOUCHE, M.B., 1978a - Discussion d'écologie 111. Transferts d'énergie entre maillons trophiques. Bull. écol., 9, 4, 289-299.
- BOUCHE, M.B., 1978b - Atlas provisoire des lombriciens de Belgique et pays limitrophes. In J. Leclercq et Ch. Gaspar "Cartographie des invertébrés européens". Ed. Fac. sci. agron. Etat, Gembloux (Belgique), 1-12.
- BOUCHE, M.B., & M. BEUGNOT, 1978 - Action du chlorate de sodium sur le niveau des populations et l'activité biodégradatrice des lombriciens. Phytatrie-Phytopharmacie, 27, 147-162.
- BOUCHE, M.B., 1980a - Discussion d'écologie. IV. L'écologie ? Doc. lab. zooécol., 6, 1-21.
- BOUCHE, M.B., 1980b - Valorisation des résidus végétaux directement au terrain : le labour et la fertilisation par les lombriciens, un potentiel à développer. C.R., coll. intern. "Agriculture et énergie", éd. CENECA, Paris, 1980, 3213, 1-4.
- BOUCHE, M.B., 1980c - L'interprétation morphologique des lombriciens : un commentaire de l'évaluation numérique de R.W. Sims. Pedobiologia, 20, 4, 227-229.
- BOUCHE, M.B., 1983a - The establishment of earthworm communities. In J.E. Satchell "Earthworm ecology from Darwin to vermiculture". Chapman et Hall, London, 431-448.
- BOUCHE, M.B., 1983b - Ecophysiologie des lombriciens : acquis récents et perspectives. In Ph. Lebrun & al. (Ed.) "New trends in soil biology" VIIIème Coll. int. zool. sol, Louvain la Neuve (Belgique), 30 août-2 sept. 1982, 321-333.
- BOUCHE, M.B., Z. RAFI'DISON & F. TOUTAIN, 1983 - Etude de l'alimentation et du brassage pédo-intestinal du lombricien *Niaodrilus uelox* (Annelida, Lumbricidae) par l'analyse élémentaire. Rev. écol. biol. sol, 20, 1, 49-75.
- BOUCHE, M.B., 1984a - Faune et flore telluriques : leur contribution à la fertilité des sols. C.R. Journées faune et flore auxiliaires en agriculture, 4-5 mai 1983, éd. ACTA Paris, 105-117.
- BOUCHE, M.B., 1984b - Ecotoxicologie des lombriciens. II. Surveillance de la contamination des milieux. Oecol. applic., 5, 4, 291-301.
- BOUCHE, M.B., & G. FERRIERE, 1986 - Cinétique de l'assimilation de l'azote d'origine lombricienne par une végétation prairiale non perturbée. C.R. Acad. sci. Paris, 302, III, 2, 75-80.
- BOUCHE, M.B., 1987 - Schématisation spatiotemporelle des inter-relations sol-écosystèmes. Rev. écol. biol. sol, 24, 3, 243-259.
- BOUCHE, M.B., P. AUPEYTT & M.A. PHILIPPE, 1988a - Etude agroenvironnementale intégrée du Marais Poitevin. Doc. pédozool., 1, 3, 1-126.
- BOUCHE, M.B., J. HAIMI & V. HUHTA, 1988b - Two earthworm taxa (*Oligochaeta*, *Lumbricidae*) new to Finland. Memoranda Soc. Fauna Flora Fennica, 64, 65-67.

- BOUCHE, M.B., sous presse - Les annélides lombriciens : une ré-évaluation. In V. Decu (dir) "Traité de zoologie du sol", Bucureşti.
- BOUCHE, M.B., Ch. FADAT & Ph. GRANVAL, en prép. - Causes et modalités des migrations régionales et transnationales de la Bécasse (*Scolopax rusticola*).
- BOUGUERRA, M.-L., 1986 - Les pesticides et le tiers monde. La Recherche, 17, 176, 544-553.
- BOUGUERRA, M.-L., 1987 - Pesticides dans les aliments : un rapport qui fera date. La Recherche, 18, 193, 1386-1387.
- BOULAINE, J., 1985 - Bénéfices d'un centenaire. Sci. sol, 4, 251-253.
- BOUROCHE, J.M., & G. SOPOROTA, 1983 - L'analyse des données, Ed. PUF, 2ème éd., coll. Que sais-je ? 1854, 1-127.
- BOWEN, G.D., D.I. BEVEGE & B. MOSSE, 1975 - Phosphate physiology of vesicular-arbuscular mycorrhizas. In F. Sanders, B. Mosse & P. B. Tinker "Endomycorrhizas". Ed. Academic press., London, 242-260.
- BRADSHAW, A.D., 1987a - Comparison - its scope and limits. In I.H. Rouson & al. "Frontiers of comparative plant ecology". Academic Press, London, 36-48.
- BRADSHAW, A.D., 1987b - Functional ecology = comparative ecology. Functional ecology, 1, 71.
- BRAUN BLANQUET, J., 1964 - Pflanzensoziologie (3ème édition). Ed. Springer Verlag, Wien, 1-865.
- BRILLOIN, L., 1951 - Maxwell's demon cannot operate : information and entropy. J. appl. phys., 22, 334.
- BRILLOIN, L., 1956 (1959) - Science and information theory. Ed. Acad. Press New York, trad. franç. 1959 - La science et la théorie de l'information, Ed. Masson, Paris, 1-302.
- BROWN, R.W., 1956 - Composition of scientific words. Ed. R.W. Brown (U.S. Natl. mus. Washington, 25 D.C.), 1-882.
- BUFFON, G.L. LECLERC comte de, 1749 - Histoire naturelle générale et particulière avec la description du cabinet du Roy. Tome second (Histoire des animaux, 1-426). Réédition : Oeuvres complètes de BUFFON, Ed. Rapet Paris (1819), 9, "Des animaux", 1-534.
- CALE, W.G., R.V. O'NEILL & R.G. GARDNER, 1983 ■ Aggregation error in nonlinear ecological models. J. theor. biol., 100, 539-550.
- CALOW, P., 1987 - Toward a definition of functional ecology. Functional ecology, 1, 57-61.
- CALLON, M., 1986 ■ La recherche industrielle : le mal français. La Recherche, 17, 183, suppl. économ., 4-10.
- CALLOT, G., H. CHAMAYOU, C. MAERTENS & L. SALSAC, 1982 - Mieux comprendre les interactions sol-racine, incidence sur la nutrition minérale. Ed. INRA, Paris, 1-325.
- CAMIZ, S., 1988 - Expert systems : utility in community studies and exemples. Coenoses, 3, 1, 33-44.
- CANCELA DA FONSECA, J.-P., 1967 - La théorie de l'information appliquée à la productivité de la microfaune du sol. In K. Pelrusewicz (red.) "Secondary productivity of terrestrial ecosystems", éd. Panstwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 2, 631-646.
- CANCELA DA FONSECA, J.-P., 1974 - Théorie des systèmes : son application à l'étude des écosystèmes. Ed. lab. zool. écol., Rennes, 1-116.
- CANCELA DA FONSECA, J.-P., 1980 - Quelques approches analytiques en dynamique de populations édaphiques (Acariens Oribates). Rev. écol. biol. sol, 17, 4, 445-447.
- CANCELA DA FONSECA, J.-P., 1982 - Sur la dynamique des peuplements d'Acariens Oribates en milieu forestier. Aspects méthodologiques. Thèse doct. d'état, Paris Orsay, 1-560.
- CANCELA DA FONSECA, J.-P., & K. HADJIBIROU, 1977 - Le modèle matriciel déterministe de Leslie et ses applications en dynamique des populations. Acta biotheoretica, 26, 4, 239-261.
- CANDOLLE, A.-P. de, 1813 - Théorie élémentaire de la botanique ou Ed. Déterville, Paris, 1-527.
- CASIMIR, D.G., 1982 - Ecosystème prairial. Acta oecol. Oecol. gen., 3, 1, 1-215.
- CAZENEUVE, J., 1968 - Connaissance (sociologie de la). In Anonyme, Encyclopedia universalis, 4, 913.
- C.D.A.F., 1842 - Complément du Dictionnaire de l'Académie Française. Ed. F. Didot, Paris, 1-1281.

- CHALAMET, A., G. LALISSE-GRUNDMANN & R. LENS1, 1987 - Facteurs de l'environnement et dénitrification dans la rhizosphere. *Rev. écol. biol. sol*, 24, 3, 419-430.
- CHAMBON, J.-P., 1982 - Incidences secondaires de traitements insecticides en végétation sur l'entomofaune des milieux céréaliers. *Phytiatrie-phytopharmacie*, 31, 19-30.
- CHARLES-DOMINIQUE, P., 1986 - Inter-relations between frugivorous vertebrates and pioneer plants : *Cecropia*, birds and bats in French Guyana. In A. Estrada & T.H. Flemings (reds) "Frugivores and seed dispersal", éd. W. Jung, Dordrecht. 119-135.
- CHARNIAK, E., & D. McDERMOTT, 1986 - Introduction to Artificial Intelligence. Ed. Addison-Wesley publ. comp., Reading, MA, 1-701.
- CHEMIN, J.-L., 1976 - Savoir préserver l'environnement. *La Recherche*, 7, 63, 83-85.
- CHRETIEN, J., 1987 - Rôle du squelette dans l'organisation des sols. Conséquences sur les caractéristiques de l'espace poral des sols sur arènes et sur terrasses fluviales. Thèse doct. es sei. nat., Univ. Dijon, 1-412.
- CIBOIS, Ph., 1983 - L'analyse factorielle. Ed. PUF, Paris, Coll. Que sais-je ?, 2095, 1-128.
- CLARHOLM, M., 1985 - Possible rôles for roots, bacteria, protozoa and fungi in supplying nitrogen to plant. In A.H. Fitter (red.) "Ecological interactions in soil plants, microbes and animals", éd. Blackwell scient. publ., Oxford, 355-365.
- CLAUSIUS, R., 1865 - Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie. *Ann. Physik u. Chemie Poggendorf*, 125, 400 (cité par Tonnelat, 1977).
- CLEMENTS, F.E., 1916 - Plant succession. Carnegie Inst. Wash., Publ. 242 (cité par TANSLEY, 1935 et FISCHER, 1972).
- COLEMAN, D.C., C.P.P. REID & C.V. COLE, 1983 - Biological strategies of nutrient cycling in soil systems. *Adv. ecol. res.*, 13, 1-55.
- CONLEY, W., B.M. SLATOR, M.P. ANDERSON & R.A. SITZE, 1986 ■ Designing a scientific problem solving environment : the NMSU Science workbench. In W.K. Michener (red.) "Research data management in the ecological sciences", éd. Univ. South Carolina press., 383-409.
- CORTEZ, J., G. BILLES & P. BOTTNER, 1985 - The isotopic composition of the soil microbial biomass and guanine isolated from soil incubated by ^{14}C and ^{15}N labelled plant material : comparison with fumigation method. *Soil biol. biochem.*, 17, 61, 773-778.
- CORTEZ, J., & G. BILLES, 1987 - ^{14}C specific activity and ^{15}N atom % excess in the soil microbial biomass as measured by the fumigation method and by the nucleic acid base methode. *Soil biol. biochem.*, 19, 1, 19-24.
- CORTEZ, J., & M.B. BOUCHE, 1987 • Composition chimique du mucus cutané de *Allolobophora ehaetophora chaetophora* (Oligochaeta, Lumbricidae). *C.R. Acad. sei. Paris*, 305, III, 207-210.
- COUTIN, R., 1961 - La diapause larvaire de *Balaninus elephas* Gyll. *C.R. acad. sei.*, 253, 2123-2125.
- CUENOT, L., 1932 ■ La genèse des espèces animales. Ed. F. Alcan, Paris, 1-822.
- DAHL, F., 1908 - Grundsätze und Grundbegriffe der biocönotischen Forshung. *Zool. Anz.*, 33, 349-353.
- DANCHIN, A., 1978a - Ordre et dynamique du vivant. Ed. Le Seuil, (cité par Danchin, 1978b).
- DANCHIN, A., 1978b - Entropie et ordre biologique. *La Recherche*, 9, 92, 788-791.
- DANCHIN, A., 1979 - Placage et modèles totalitaires. In P. Delattre et H. 3'hellier (reds) "Elaboration et justification des modèles", éd. Maloine, Paris, 39-56.
- DARWIN, C.R., 1837 - On the formation of the mould. *Proc. geol. soc. London*, 5, 505-509.
- DARWIN, C.R., 1859 - The origin of species by means of natural selection, or the preservation of favored races in the struggle for life (6ème éd., corrigée 1878). Ed. J. Murray, London, 1-458.
- DARWIN, C.R., 1870 - De la fécondation des orchidées par les insectes et des bons résultats du croisement. Ed. C. Reinwald et Cie, Paris, 1-352.
- DARWIN, C.R., 1881 - The formation of vegetable mould through the action of worms with observations on their habits. Ed. John Murray and Co., London, 1-326.
- DELATTRE, P., & H. THELLIER, 1979 - Elaboration et justification des modèles, applications en biologic. Ed. Maloine, Paris, 1-370.
- DELECOUR, F., 1980 - Essai de classification pratique des humus. *Podologie*, 30, 2, 225-241.

- DELOBEL, C., & M. ADIBA, 1982 - Base de données et systèmes relationnels. Ed. Dunod Paris, informatique, 1-449.
- DENNIS, B., G.P. PATIL, O. ROSSI, S. STEHLMAN & C. TAILLIE, 1979 - A bibliography of literature on ecological diversity and related method. In J.F. Grassie, G.P. Patil, W. Smith & C. Taillie (eds) "Ecological diversity in theory and practice", éd. int. coopérat., publ. house, Fairland, MA, USA, 319-333.
- DEVRIES, J., 1968 - Les premières étapes de la segmentation (formation de la jeune blastule) chez le lombricien *Eisenia foetida*. Bull. soc. zool. Fr., 93, 1, 87-97.
- DI CASTRI, F., 1984 - L'écologie. Les défis d'une science en temps de crise. Rapport au Ministre Ind. Reeh., éd. La Documentation française, Paris, 1-116.
- DI CASTRI, F., 1987 - Towards a common language from molecular biology to biospheric ecology ? Biol. int., spec. issue, 15, 3-9.
- DI CASTRI, F., F.W.G. BAKER et M. HADLEY, 1984 - Ecology in practice. Ed. UNESCO, Paris, 1, 1-524 ; 2, 1-396.
- DI CASTRI, F., & M. HADLEY, 1985 - Enhancing the credibility of ecology : can research be made more comparable and predictive ? Geojournal, 11, 4, 321-338.
- DI CASTRI, F., & M. HADLEY, 1986 - Enhancing the credibility of ecology : is interdisciplinary research for land use planning useful ? Geojournal, 13, 4, 299-325.
- DI CASTRI, F., & M. HADLEY, 1988 ■ Enhancing the credibility of ecology : interacting along and across hierarchical scales. Geojournal, 17, 1, 5-35.
- DI CASTRI, F., A.J. HANSEN & M.M. HOLLAND, 1988 - A new look at ecotones. Bio, intern., 17, 1-163.
- DIDAY, E., & L. LEBART, 1977 ■ L'analyse des données. La Recherche, 8, 74, 15-25.
- DIETZ, S., 1979 - Etude de l'incorporation de la litière en système herbacé à l'aide de matériel végétal marqué au C^{14} . Thèse 3ème cycle Ecologie terrestre. Univ. Sci. Techn. Languedoc, Montpellier, 12/11/79, 1-78.
- DIETZ, S. & P. BOTTNER, 1981 - Etude par autoradiographie de l'enfouissement d'une litière marquée au ^{14}C en milieu herbacé. Coll. int. CNRS 303 "Migrations organo-minérales dans les sols tempérés". Ed. CNRS Paris, 125-132.
- DIGHTON, J., E.D. THOMAS & P.M. LATTER, 1987 - Interactions between tree roots, mycorrhizas, a saprophytic fungus and the decomposition of organic substrates in a microcosm. Biol. fertil. soils, 4, 3, 145-150.
- DOEBEREINER, J., 1974 - Nitrogen-fixing bacteria in the rhizosphere. In A. Quispel (red.) "The biology of nitrogen fixation", éd. North Holland, Amsterdam, 86-120.
- DOKUCHAYEV, V.V., 1886 - Glavnyye momenty v istorii otsenok zemel' Yevropeyskoj Rosii S klassifikatsiyey russkikh pochv (Périodes principales de l'histoire de l'évaluation des sols de la Russie européenne avec une classification des sols Russes). Otchev Nizhgorod. gubern. zemstvu. St Petersburg, 1-121.
- DOMMERGUES, Y., & F. MANGENOT, 1970 - Ecologie microbienne du sol. Ed. Masson, Paris, 1-796.
- DUCHAUFOR, Ph., 1977 - Pédologie. 1. Pédogenèse et classification. Ed. Masson, Paris, 1-477.
- DUCHAUFOR, Ph., & F. TOUTAIN, 1985 - Apportée la pédologie à l'étude des écosystèmes. Bull. écol., 17, 1, 1-9.
- DUDAL, R., 1987 - The role of pedology in meeting the increasing demands of soil. C.R. XIII cong. assoc. int. sci. sol, éd. ISSS, Ordinariat f. Bodenk., Hamburg, 86-96.
- DUYNISVELD, W.H.M., O. STREBEL & J. BOETTCHER, 1988 - Are nitrate leaching from arable land and nitrate pollution of groundwater avoidable ? Ecol. bull., 39, 1 16-125.
- EASTON, E.G., 1983 - A guide to the valid names of Lumbricidae (Oligochaeta). In J.E. Satchell "Earthworm ecology from Darwin to vermiculture", éd. Chapman & Hall, London, 475-481.
- ECKARDT, F.E., 1968 - Techniques de mesure de la photosynthèse sur le terrain basée sur l'emploi d'enceintes climatisées. In F.E. Eckardt (red.) "Functioning of terrestrial ecosystems at primary production level", éd. UNESCO, Paris, 289-319.
- EDWARDS, C.A., (red.) 1973 - Environmental pollution by pesticides. Ed. Plenum press, London, 1-542.
- EHLERS, W., 1973 - Gesamtporenvolumen und Porengrössenverteilung in unbearbeiteten und bearbeiteten Ixisboden. Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 134, 193-207.

- EHRLICH, P.R., A.H. EHRLICH et J.P. HOLDEN, 1977 - ECOSCIENCE : Population, resources, environment. Ed. W.H. Freeman and Co, San Francisco, CA, USA, 1-1051.
- EIJSSACKERS, H., & A. QUISPÉL, (reds) 1988 - Ecological implications of contemporary agriculture. Ecol. bull., 39, 1-21 1.
- ELLENBERG, H., (red.) 1971 - Integrated experimental ecology. Ecological studies, 2, Springer Verlag, Berlin, 1-214.
- ELLIOT, E.T., D.C. COLEMAN & C.V. COLE, 1979 - The influence of amoebae on the uptake of nitrogen in gnotobiotic soil. In J.L. Harley & R. Scott Russel (reds) "The soil-root interface", éd. Academic press, Ixtnodon, 221-230.
- ELLIOT, E.T., & D.C. COLEMAN, 1988 - Let the soil work for us. Ecol. bull., 39, 23-32.
- EL-SHISHINY, IL, & S. GHABBOUR, 1987 - Environmental site characterization by soil fauna in Egypt and Africa. 2. Final results. IBM Cairo scient. cent., techn. report 028, 1-115.
- ELTON, Ch., 1927 - Anima ecology. Ed. Sidgwich and Jackson, ré-édité par Associated book publishers Ltd, London, 1971, 1-207.
- EMANUEL, W.R., G.E.G. KILLOUGH & J.S. OLSON, 1981 • Modelling the circulation of carbon in the World terrestrial ecosystems. In B. Bolin (red.) "Carbon cycle modelling". Ed. John Willey and sons, Chichester, UK, 335-353.
- ESCOUFIER, Y., 1987 - Méthodes statistiques basées sur un usage intensif de l'ordinateur. Rapp. techn. 8702, éd. unité biométrie, ENSAM-INRA Montpellier, 1-16.
- EVANS, A.C., 1946 - A new species of earthworm of the genus *Allolobophora*. Ann. mag hist., ser II, 18, 98-101.
- FAGES, R., 1978 - La notion de dispersion en classification automatique. Communication Journées de Statistiques, Nice, 22-26 mai 1978, (cité in Roux, 1985).
- FERRIERE, G., 1980 - Fonctions des lombriciens. VIL Une méthode d'analyse de la matière organique végétale ingérée. Pedobiologia, 20, 263-273.
- FERRIERE, G., 1986 Mouvements naturels des éléments dans une prairie : quantification des échanges d'azote entre lombriciens, sol et plantes. Thèse doct. d'état ès sciences, Univ. Lyon I, 23/06/86, 1-98.
- FERRIERE, G., & M.B. BOUCHE, 1985 - Première mesure écophysologique d'un débit d'élément dans un animal endogé : le débit d'azote de *Nicodrilus longus longus* (Ude) (Lumbricidae, Oligochaeta) dans la prairie de Cîteaux. C.R. acad. sei. Paris, 301, III, 17, 789-794.
- FEYERABAND, P., 1979 - Contre la méthode. Ed. du Seuil, 1-350 (Trad. : Against method, 1975, New left books, London).
- FISCHER, J.-C., 1972 - La paléoécologie. La Recherche, 3, 22, 335-343.
- FITTER, A.H., D. ATKINSON, D.J. READ & M.B. USHER, 1985 - Ecological interactions in soils, plants, microbes and animals. Ed. Blackwell scient. publ. Oxford, 1-451.
- FLEURY, D., 1988 - La science a-t-elle une mémoire ? Le cas de la maladie de l'orme. La Recherche, 19, 197, 406-411.
- FORBES, S.A., 1877 • The lake as a microcosm. Preoria scientif. assoc., 77-87 Un E.J, Kormondy, 1965 "readings in ecology", éd. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., USA, 168-171).
- FORD, E.B., 1972 - Génétique évolutive. Ed. Gauthier-Villars, Paris, 1-448.
- FORMAN, R.T.T., & M. GODRON, 1986 - Landscape ecology. Ed. Wiley, New York, 1-619.
- FOUCART, T., 1982 - Analyse factorielle. Programmation sur microordinateur. Ed. Masson, Paris, 1-244.
- FRANKINET, M., L. RIXHON, A. CROHAIN & L. GREVY, 1979 - Labour, demi-labour et semis direct en continu : conséquences phytotechniques. Bull. rech. agron. Gembloux, 14, 1, 35-96.
- FRIEDERICH, K., 1927 - Grundsätzliches über die Lebenseinheiten höherer Ordnung und den ökologischen Einheitsfaktor. Die Naturwissensch., 15, 7, 153-186.
- FRONTIER, S., (red.) 1983 - Stratégies d'échantillonnage en écologie. Ed. Masson, Paus, cl PUL, Québec. 1-494.
- GALE, W.A., (red), 1986 - Artificial intelligence and statistics. Ed. Addison Wesley publ. comp., Reading, MA, USA, 1-418.

- GALOUX, A., 1983 - L'écosystème de la chênaie mélangée de Vireiles-Blaimont ; aspects fonctionnels et thermodynamiques. Stat. rech. forest, hydrobiol., travaux, A, 28, 1-73.
- GALZIN, Ph., 1988 - Aux JIJA 88, SGBD et Systèmes Experts : les deux font la paire. 01 Informatique, 1014, 14.
- GAMS, H., 1918 ■ Prinzipienfragen der Vegetationsforschung. Viertelschr. Naturf. Ges. Zurich, 53, 293-493.
- GARDNER, R.H., W.G. CALE & R.V. O'NEILL, 1982 - Robust analysis of aggregation error. Ecology, 63, 6, 1771-1779.
- GAUSE, G.F., 1934 - Eksperimental'noe issledovanie borby za sušestvovanie meidu *Paramecium cfludatum*, *Paramecium aurelia* i *Stylonichia mytilus*. Zool. zhurn., 13, 1, 1-17.
- GEOFFROY ST HILAIRE, E., 1820 - Sur quelques règles fondamentales en philosophie naturelle. Ann. gén. sci. phys., Bruxelles, 3, 263-272.
- GERMANN, P.F., W.H. EDWARDS & L.B. OWENS, 1984 - Profiles of bromide and increased soil moisture after infiltration into soils with macropores. Soil sci. soc. Am. j., 48, 237-244.
- GHILAROV, M.S., 1956 (1958) - L'importance du sol dans l'origine et l'évolution des insectes. Proc. X int. cong. entomol., 1, 443-451. (1956 ; en russe, Entomologicheskoe obozrenie, 35, 3, 487-494).
- GILLARD, A., 1969 - On the terminology of biosphere and ecosphere. Nature, 223, 500-501.
- GODRON, M., Ph. DAGET, L. EMBERGER, G. LONG, E. LE FLOC'H, J. POISSONET, Ch. SAUVAGE & J.-P. WACQUANT, 1968 - Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu. Ed. CNRS, Paris, 1-292.
- GOULD, S.J., & R.C. LEWONTIN, 1982 - L'adaptation biologique. La Recherche, 13, 139, 1494-1502.
- GOUNOT, M., & M.B. BOUCHE, 1974 - Modélisation de l'écosystème prairial : objectifs et méthodes. Bull. écol., 5, 4, 309-338.
- GOUNOT, M., & O. YU, 1980 - Recherches sur l'évaluation de la productivité primaire épigée des graminées prairiales. Acta oecol. plant., 15, 1, 81-102.
- GOUTEUX, J.-P., 1977 - Les incertitudes de la taxonomie. La Recherche, 8, 81, 793-795.
- GOUZE, J.L., & P. VIGNARD, 1984 - EDORA : un système intelligent d'aide à la modélisation. ANSE Review, 2, 3, 9-26.
- GOWER, J.C., 1966 - Some distance properties of latent root and vector methods used in multivariate analysis. Biometrika, 53, 325-338.
- GRANDJEAN, F., 1947a - Sur la distribution de deux sortes de temps en biologie évolutive et sur l'attribution d'une phylogenèse à chaque état statique de l'ontogenèse. C.R. acad. sci. Paris, 225, 612-615.
- GRANDJEAN, F., 1947b - L'harmonie et la dysharmonie chronologiques dans l'évolution des stases. C.R. acad. sci. Paris, 225, 1047-1050.
- GRANDJEAN, F., 1954 - Essai de classification des Oribates (Acariens). Bull. soc. zool. Fr., 78, (1953), 421-446.
- GRANVAL, Ph., 1988 ■ Approche écologique de la gestion de l'espace rural : des besoins de la Bécasse à la qualité des milieux. Thèse Univ. Rennes I, 19/12/88, 1-186 + Annexes.
- GRANVAL, Ph., & R. ALIAGA, 1988 - Analyse critique des connaissances sur les prédateurs de lombriciens. Gibier et faune sauvage, 5, 71-94.
- GRANVAL, Ph., & M.B. BOUCHE, en prép. - Rôles des lombriciens vis-à-vis du semis direct en grande culture.
- GREENSLADE, P.J.M., 1972 - Evolution in the Staphilinid genus *Priochirus* (Coleoptera). Evolution, 26, 203-220.
- GREENSLADE, P.J.M., 1982 - Selection processes in arid Australia. In W.R. Barker & P.J.M. Greenslade (eds) "Evolution of the flora and fauna of arid Australia". Ed. Peacock pub!., Adelaide, 125-130.
- GRIME, J.P., 1979 - Plant strategies and vegetation processes. Ed. John Wiley and sons, Chichester, 1-222.
- GRINNEL, J., 1917 ■ The niche-relationships of the California thrasher. Auk, 34, 427-433.
- GRINNEL, J., 1928 - Presence and absence of animals. Univ. California chron., 30, 429-450.

- G.R.L.F., 1985 - Le Grand Robert de la Langue française, Ed. dictionnaire Le Robert, Paris, 1, 1-1000.
- GRUYS, P., D.J. de JONG & M. van de VR1E, 1973 - The development of an integrated control programme for apple orchards in the Netherlands : problems and prospects. In Proc. FAO Conf. "Ecology in relation to plant pest control", FAO, Roma, 127-138.
- GUCKERT, A., 1973 - Contribution à l'étude des polysaccharides dans les sols et de leur rôle dans les mécanismes d'agrégation. Thèse Univ. Nancy 1, GER, STMCM (CNRS n° AO 8319), 1-138.
- HADJIBIROS, K., 1978 - Simulation d'un système prédateur-proie à partir d'un modèle matriciel. Thèse doct. spécial. Univ. Paris VII, 1-146.
- HAECKEL, E., 1866a & b - Generelle Morphologie der Organismen (1866a : Tome 1) Allgemeine Anatomie der Organismen oder Wissenschaft von den entwickelten organischen Formen, 1-463. (1866b : Tome 2) Allgemeine Entwicklungsgeschichte der Organismen oder Wissenschaft von den entstehenden organischen Formen. Ed. G. Reiner. Berlin, 1-574.
- HAECKEL, E., 1884 - Histoire de la création des êtres organisés d'après les lois naturelles (traduit de l'allemand : 1866). Ed. Reinwald, Paris, 1-606.
- HALL, C.A.S., & J.W. DAY, 1977 - Systems and models : terms and basic principles. In C.A.S. Hall & J.W. Day (eds) "Ecosystem modelling in theory and practice". Ed. John Wiley, New York, 5-36.
- HAMEED, R., 1989 - Etude des transformations et translocations de l'azote sous influences lombricienne et microbienne. Modèles et validation écologiques. Thèse de doctorat d'université, USTL, Montpellier, 1-160.
- HARPER, J.L., 1961 - Population biology of plants. Ed. Academic press, London, 1-892.
- HEIDET, J.-C., & M.B. BOUCHE, sous presse - Régulation de l'activité lombricienne : influence de la température, de la photopériode et de l'humidité *in situ* sur l'indice de mobilité de *Nicodrilus longus longus* (Ude) (Lumbricidae, Oligochaeta). C.R. X Coll. int. zool. sol, Bangalore (Inde).
- HELLER, R., 1964 - Biologie végétale. 2. Nutrition et métabolisme. Ed. Masson, Paris, 1-578.
- HENNIG, W., 1950 - Grunzüge einer Theorie der phylogenetischen Systematik. Ed. Deutscher Zentralverlag, Berlin, 1-370.
- HENRY, C., 1984 - Organisation de la recherche et de la formation pour la maîtrise écologique du territoire. Rapport de mission, sec. état premier min. environ, qualit. vie, 1-166.
- HENSEN, V., 1877 - Die Thätigkeit des Regenwurmes (*Lumbricus terrestris* L.) für die Fruchbarkeit des Endbodens. Zeitschrift f. wiss. Zoologie, 28, 354-364.
- HOLLAND, H.D., 1972 - The geologic history of sea water. Geochem. cosmochem., acta, 36, 637-651.
- HUGHES, R.N., 1987 - The functional ecology of clonal animals. Function, ecol., 1, 63-69.
- HSÜ, K.J., 1972 ■ When the mediterranean dried up. Scientific amer., 227, 6, 26-36.
- HUHTA, V., R. HYVONEN, M. SULANDER, A. KOSKENNIEMI, P. KAASALAINEN & P. VILKAMAA, 1986 ■ Response of soil fauna to fertilization and manipulation of pH in coniferous forest. Acta forest. fenn., 195, 1-30.
- HULBERT, S.H., 1971 - The non-concept of species diversity : a critique and alternative parameters. Ecology, 52, 577-586.
- HUTCHINSON, G. Evelyn, 1957 - Concluding remarks. Cold Spring Harb. symp. quant. biol., 22, 415-427.
- HUTCHINSON, G. Evelyn, 1961 - The paradox of the plankton. Amer. naturalist., 95, 882, 137-145.
- IBM, Corp. 1981 - SQL Data systems, concepts and facilities. Manual GH 24-5013D.
- JAENICKE, J., 1982 - "*Eisenia foetida*" is two biological species. Megadrilogica, 4, 6-8.
- JAILLARD, B., 1983 - Mise en évidence de la calcification des cellules corticales de racines de Graminées en milieu carbonaté. C.R. Acad. sci. Paris, 297, sér. 2, 293-296.
- JAILLARD, B., 1987 - Les structures rhizomorphes calcaires : modèle de réorganisation des minéraux du sol par les racines. Ed. lab. sci. sol., INRA, Montpellier, 1-228.
- JENKINSON, D.S., 1966 - The use of isotopes in soil organic matter studies : the priming action. J. appl. radial. isotopes, suppl. (éd. Pergamon Press Oxford), 199-208.
- JOCTEUR MONROZIER, L., & Ph. DUCHAUFOR, 1986 - Données récentes sur l'humification. Sci. sol, 25, 4, 377-388.

- JORGENSEN, S.E., 1986 - Fundamentals of ecological modellings. Ed. Elsevier, Amsterdam, 1-389.
- JULLJOT, C., 1987 - Contribution à l'étude de l'utilisation de l'espace par le renard roux (*Vulpes vulpes*). Relation avec la distribution des ressources alimentaires. DEA biol. popul., éco.-éthol., Univ. Tours, 1-65.
- KANWAR, R.S., J.L. BAKER & J.M. LAFLIN, 1985 - Nitrate movement through the soil profile in relation to tillage system and fertilizer application method. Trans. am. soc. agric. eng., 28, 1731-1735.
- KOESTLER, A., 1967 - The ghost in the machine. Ed. Macmillan, NY (cité in Allen & Stai r, 1982).
- KORMONDY, E.J., 1969 - Concepts of ecology. Ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1-209.
- KUEHNELT, W., 1940 - Aufgabe und Arbeitsweise der Oekologie der Landtiere. Biologie, 9, 108-117.
- KUEHNELT, W., (1965 1 Auflage) 1970 • Grundriss der Oekologie. (2 Auflage). G. Fischer Verlag, Jena, 1-443 (trad. 1ère éd. : 1969 Ecologie générale. Masson et Cie, Paris, 1-359).
- KRETZSCHMAR, A., 1978 - Quantifications écologiques des galeries de lombriciens. Technique et premières estimations. Pedobiologia, 18, 31-38.
- KUHN, T.S., 1970 - The structure of scientific revolutions (2nd edition, enlarged, Univ. Chicago press) Trad. 1983, La structure des révolutions scientifiques. Ed. Flammarion, Paris, coll. champs, 1-285.
- LABEYRIE, J., 1978 - Les aérosols. La Recherche, 9, 87, 209-218.
- LABEYRIE, V., 1986 - Confession d'un bricoleur. Le petit pois déridé, 13, (nov. 86), 2.
- LACOUR, P., 1987 - Pour une nouvelle gestion de l'espace rural (La faune sauvage : un atout pour le monde rural). Commission environ, aménag. territ. pour spéc., Conseil de l'Europe, 1-18.
- LAFONT, M., 1989 - Contribution à la gestion des eaux continentales : utilisation des Oligochètes comme descripteurs de l'état biologique et du degré de pollution des eaux et des sédiments. Thèse doct. d'état ès science, Univ. Lyon I, 14/03/89, 1-311 + Ann.
- LAING, J.E., J.H. HERATY and J.E. CORRIGAN, 1986 - Ixíaf burrial by the earthworm, *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae) as a major factor in the population dynamics of *Phyllomorycter blancardella* (Lepidoptera, Gracillariidae) and its parasites. Environ, entomol., 15, 2, 321-326.
- LAISSUS, R., 1985 - Resemis des prairies permanentes sans labour préalable, après l'emploi de désherbants totaux favorisant l'action des lombrics pendant l'hiver sur la structure du sol. C.R. Acad, agric. Fr., 71, 3, 229-240.
- LAL, R., 1987 - Impact of farming systems on soil erosion in the tropics. C.R. 13è cong. assoc, int. sci. sol, éd. ISSS, Ordinariat f. Bodenk., Hamburg, 97-111.
- LAMARCK, J.-B. de, 1799 - Sur les fossiles et l'influence du mouvement des eaux, considérées comme preuves... In Procès verbaux Séances acad., 1, an IV-VII, (repris dans Lamarck, 1802).
- LAMARCK, J.-B. de, 1802 (an X) - Hydrogéologie ou recherches sur l'influence du mouvement des eaux, considérées comme preuves... Ed. L'auteur, Paris, 1-268.
- LAMARCK, J.-B. de, 1809 - Philosophie zoologique ou exposition des considérations... Ed. Dentu, 1, 1-428 ; 2, 1-475.
- LAMARCK, J.-B. de, 1815 - Histoire naturelle des animaux sans vertèbres, ... (introduction). Ed. Verdière, Paris, 1, 1-462.
- LAMARCK, J.-B. de, 1822 - Histoire naturelle des animaux sans vertèbres, ... Ed. Verdière, Paris, 7, 1-711 (cité par G. Laurent, 1987).
- LAMBERT, G., 1987 - ~~gaz~~ carbonique dans l'atmosphère. La Recherche, 18, 189, 778-787.
- LAROUSSE, 1964 - Grand Larousse encyclopédique. 10, Ed. Librairie Larousse, Paris, 1-302.
- LASZLO, P., 1984 ■ Les argiles, matériaux de la chimie moderne. La Recherche, 15, 159, 1282-1284.
- LAURENT, G., 1986 - Cuvier et Lamarck : la querelle du catastrophisme. La Recherche, 17, 183, 1510-1518.

- LAURENT, G., 1987 - Paléontologie et évolution en France 1800-1860, de Cuvier-Lamarck à Darwin. Ed. comm. trav. hist. sci., Paris, 1-552.
- LAURIERE, J.-L., 1987 - Intelligence artificielle - résolution de problèmes par l'homme et la machine. Ed. Eyrolles Paris, 1-473.
- LAVELLE, P., B. SOW & S. SCHAEFER, 1980 - The geophagous earthworm community in the Lamto savanna (Ivory Coast) : niche partitioning and land utilization of soil nutritive resources. In D.L. Dindal (Red.) "Soil biology as related to land use practices", éd. EPA-560/13-80-038, Washington, 653-672.
- LAWTON, J., 1987 • Problems of scale in ecology. *Nature*, 325, 6101, 206.
- LEBRETON, J.I. & C. MILLIER, 1982 - Modèle dynamique déterministe en biologie. Ed. Masson et Cie, Paris, 1-208.
- LEBRETON, Ph., 1987 - Peut-on parler d'écologie urbaine. *Bull. écol.*, 18, 3, 203-206.
- LEBRUN, Ph., 1980 - A preliminary study of the use of some soil mites in bioassays for pesticide residue detection. In D.L. Dindal (red.) "Soil biology as related to land use practices", éd. EPA-560/13-90-038, Washington, 42-55.
- LEFEUVRE, J.-CL., 1981 - Les études scientifiques, un préalable indispensable à la restructuration foncière et à l'aménagement des zones agricoles bocagères. In Anonyme, 1981 (op. cit.), 169-192.
- LEFEUVRE, J.-CL., 1983 - Avant-propos. In "Réflexions sur la notion d'indicateurs biologiques", éd. Unité d'écodéveloppement, INRA SAD, 1-3.
- LEFEUVRE, J.-CL., 1986 - Intensification de l'agriculture et usage des produits insecticides : évaluation des risques pour les équilibres biologiques, la faune et la santé humaine. In Anonyme "Insectes, insecticides, santé", éd. ACTA, Paris, 7-70.
- LEFKOVITCH, L.P., 1965 - The study of population growth in organisms grouped by stages. *Biometrics*, 21, 1-18.
- LEE, K.E., 1959 - The earthworm fauna of New Zealand. *Natl. Dept. Sci. Indust. Res.*, 130, 1-486.
- LEGAY, J.-M., 1986 - Quelques réflexions à propos de l'écologie : défense de l'indisciplinarité. *Acta oecol., Oecol. gen.*, 7, 4, 391-398.
- LEGAY, J.-M., 1987 ■ Introduction au colloque. In J.-M. Legay "Biologie des populations" éd. IASBSE, Univ. Lyon I, ix-x.
- LEMEE, G., 1967 - Précis de biogéographie. Ed. Masson, Paris, 1-358.
- LEROY, Y., 1974 - Le minétisme animal. *La Recherche*, 5, 45, 417-425.
- LESLIE, P.H., 1948 - Some further notes on the use of matrices in population mathematics. *Biometrika*, 35, 213-245.
- LEVENE, IL., 1953 - Genetic equilibrium when more than one ecological niche is available. *Am. nat.*, 87, 331-333.
- LEVY, H., 1932 - The universe of science. London (cité par l'ansley, 1935).
- LEWIS, E.G., 1942 - On the generation and growth of a population. *Saukhya*, 6, 93-96.
- LEWONTIN, R., 1974 - The evolutionary basis of evolutionary change. Ed. Columbia Univ. Press, 1-346 (cité par A. Jacquard. *La Recherche*, 53, 176-177).
- LIEBIG, J., 1840 - in (Liebig's complete works on chemistry, T.B. Peterson, Philadelphia, 1841) réimprimé in E.J. Kormondy, 1965, op. cit.
- LILIN, Ch., & B. PAULET, 1987 - L'érosion des sols cultivés en France : développement actuel et actions entreprises. *Bull. lechn. inf.*, 447, 71-94.
- LIN, Jin-Lu, M. FULLER & Wen-You ZHANG, 1985 - Preliminary phanerozoic polar wander paths for the North and South China blocks. *Nature*, 313, 444-449.
- LINDEMAN, R.L., 1942 - The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology*, 23, 4, 399-418.
- LITTRE, E., & Ch. ROBIN, 1865 - Dictionnaire de médecine, de chirurgie, de pharmacie, des sciences accessoires et de l'art vétérinaire. Ed. Baillière et fils, Paris, 1-1800.
- LITTRE, E., 1976/77 Dictionnaire Littré de la langue française. Ed. Fainot, Genève, 1-5081.
- LLIBOUTRY, L., 1985 • Modèles et révolution en science de la Terre. *La Recherche*, 163, 272-278.
- LONG, G., 1974 - Diagnostic phytoécologique et aménagement du territoire. 1. Principes généraux et méthodes. Ed. Masson et Cie, Paris, 1-252.
- LONG, G., 1975 - Diagnostic phytoécologique et aménagement du territoire. 11. Application du diagnostic phytoécologique. Ed. Masson et Cie, Paris, 1-222.

- LOPEZ-ASSAD, M., dit RIBEIRO, 1987 - Contribution à l'étude de la macroporosité lombricienne de différents types de sols de France. Thèse Doct. 3ème cycle, spéc. Science du sol, USTL/ENSAM Montpellier, 21/05/87, 1-240.
- LOQUET, M., T. BHATNAGAR, M.B. BOUCHE, & J. ROUELLE, 1977 - Essai d'estimation de l'influence écologique des lombriciens sur les microorganismes. *Pedobiologia*, 17, 6, 400-417.
- LOUSTAU, D., 1984 - Morphologie et fonctionnement biodynamique de quelques humus hydromorphes de l'est de la France. Thèse doct. 3ème cycle, Univ. Nancy I, 1-150.
- LUXTON, M., 1982 - 7. Quantitative utilization of energy by the soil fauna. In Petersen & Luxton, 1982, *Oikos*, 39, 3, 342-354.
- LWOFF, A., 1943 - L'évolution physiologique. Ed. Hermann et Cie, Paris, 1-308.
- LWOFF, A., 1983 - Sur le prétendu principe de falsification de Karl Popper et sur quelques divagations logomachiques. *La Recherche*, 14, 142, 368-369.
- LYELL, Ch., 1832 - Principles of geology, being an attempt to explain... Ed. J. Murray, London, 2, 1-586.
- LYELL, Ch., 1837 - Principles of geology, or the modern changes of the Earth and its inhabitants... Ed. J. Murray, London, 1, 1-420.
- MAC ARTHUR, R.H., 1962 - Some generalized theorems of natural selection. *Proc. natl. acad. sci.*, 48, 1893-1897.
- MAC ARTHUR, R.H., 1968 - The theory of niche. In R.C. Lewontin, red., "Population biology and evolution", éd. Syracuse Univ. Press, 159-176.
- MAC ARTHUR, R.H., & E.O. WILSON, 1967 - The theory of island biogeography. Ed. Princeton univ. press, N.J., 1-203.
- MACDONALD, D.W., 1980 - The red fox *Vulpes vulpes* as a predator upon earthworms, *Lumbricus terrestris*. *Z. Tierpsychol.*, 52, 171-200.
- MACFADYEN, A., 1961 - Improved funnel-type extractors for soil Arthropods. *J. anim. ecol.*, 30, 171-182.
- MACFADYEN, A., 1978 - The ecologist's rôle in the international scientific community - presidential address. *Oikos*, 31, I, 1-2.
- MALTHUS, T.R., 1804 - (Essai sur le principe de population). Trad. P. Theill, Ed. Gonthier, Paris (1963), 1-236.
- MARGALEF, R., 1957 - La teoría de la información en ecología. *Mem. roy. acad. Barcelona*. 32, 13, 373-449.
- MARGALEF, R., 1968 ■ Perspectives in ecological theory. Univ. Chicago press, public., I-I 1 1.
- MARGALEF, K., 1982 - Ecología. Ed. Omega S.A., Barcelona, 1-951.
- MARGALEFF, R., 1984 - Le plancton de la méditerranée. *La Recherche*, 15, 158, 1082-1094.
- MARIOTTT, A., A. BEN HALIM A & G. BERGER, 1976 - Apport de l'étude isotopique de l'azote à la connaissance de la pollution des aquifères souterrains par les nitrates, en milieu agricole (Brie, Beauce - France). *Rev. géogr. phys. et géol. dyn.*, 18, 375-384.
- MARTIN, A., J. CORTEZ, I. BAROIS & P. LAVELLE, 1987 - Les mucus intestinaux de vers de terre, moteur de leurs interactions avec la microflore. *Rev. écol. biol. sol*, 24, 4, 549-558.
- MICHAELSEN, W., 1922 - Die Verbreitung der Oligochäten im Lichte der Wegener'shen Theorie der Kontinentenverschiebung und andere Fragen zur Stammesgeschichte und Verbreitung diese Tiergrupp. *Verhandl. Naturwiss. Ver. Hamburg*, 29, 45-79.
- MICHENER, W.K., 1986 - Research data management in the ecological sciences (red.). Ed. Univ. South Carolina press, Columbia, 1-426.
- MILLER, S.L., 1953 - A production of amino acids under possible primitive Earth conditions. *Science*, 117, 528-529.
- MILLOT, G., G. BOCQUIER et H. PAQUET, 1976 - Géochimie et paysages tropicaux. *La Recherche*, 7, 65, 236-244.
- MILNE, A., 1961 - Definition of competition among animals. In F.L. Milthorpe (red.) "Mechanisms in biological competition". *Symp. soc. exp. biol.*, 15, 40-61.
- MITCHELL, P., 1966 - Chemiosmotic coupling in oxydative and photosynthetic phosphorylation. *Glynn research*, Bodmin, Cornwall, 1-86.
- MOEBIUS, K., 1877 - Die Auster und die Austerwirtschaft. Ed. Parey, Berlin, 1-126.

- MONNIER, G., 1963 - Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse lac. sci., Paris, éd. INRA, Paris, 1-140.
- MORIN, E., 1985 - La méthode. Ed. Seuil, Paris. 1. La vie de la vie, 1-399. 2. La nature de la nature, 1-470.
- MORVAN, P. (dir.), 1986 - Dictionnaire de l'informatique. Ed. Larousse, Paris, 1-341.
- MULLER, P.E., 1878, 1884 - Studier over Skovjord. I. Oin Bogemuld og bøgemor paa Sand og Ler. Tidsskrift for Skovbrug, 3, II. Ont Muld og Mor i Egeskove og paa Heder. Tidsskrift for Skovbrug, 7. (Trad. : 1889, Recherches sur les formes naturelles de l'humus. Ann. sci. agron., 1, 1-143).
- MURDOCH, W.W., 1966 - Community structure, population and competition. Amer. nat., 100, 219-226.
- NELDER, J.A., & R. MEAD, 1965 - A simple method for function minimization. The computer j., 7, 308-313.
- ODUM, E.P., (1953) 1959 (1972) - Fundamentals of ecology. Ed Saunders, Philadelphia (2ème ed.), 1-546 (1953 : 1ère ed.) (1972 : 3ème ed.).
- ODUM, E.P., 1957 - Trophic structure and productivity of Silver Springs. Ecol. monogr., 27, 55-112.
- ODUM, H.T., 1982 - Systems ecology ; an introduction. Ed. John Wiley and S., New York, 1-644.
- OHNO, S., 1970 - Evolution by gene duplication. Springer Verlag, New York, 1-160.
- OHNO, S., 1980 - L'évolution des gènes. La Recherche, 11, 107, 4-14.
- O'NEIL, R.V., D.L. De ANGELIS, J.B. WAIDE & T.F.H. ALLEN, 1986 - A hierarchical concept of ecosystems. Monographs in pop. biol., 23, ed. Princeton Univ. press, Princeton N.J., 1-253.
- O'NEIL, R.V., R.H. GARDNER, L.W. BARNHOUSE, G.W. SUTER, S.G. HILDEBRAND & C.H. GEHRS, 1982 Ecosystem risk analysis : a new methodology. Environ. toxicol. chem., 1, 167-177.
- OSBORNE, I*, 1984 - Bird numbers and habitat characteristics in farm land hedgerows. J. appl. ecol., 21, 63-82.
- OZIMA, M., & II. MARTY, 1983 - L'origine de l'atmosphère. La Recherche, 14, 141, 176-184.
- PARRY, G.D., 1981 - The meanings of r and K-selection. Oecologia (Berl.), 48, 260-264.
- PATTEN, B.C., 1971/72 - Systems analysis and simulation in Ecology. Academic Press. Vol. I (1971), 1-607. Vol. II (1972), 1-512.
- PAVE, A., 1982 - 3. Modèles à compartiments linéaires. In J.D. Lebreton et C. Millier (op. cit.), 99-134.
- PAVE, A., 1987 - Systèmes experts : application à la modélisation en biologie. Matapli, 11, 5-19.
- PERN ES, J., 1984 - Gestion des ressources génétiques des plantes. Ed. Lavoisier, Paris, techn. doc., vol I, Monographie, 1-211, vol II, Manuel, 1-346.
- PERRIER, Ph., 1989 - La conception des avions par ordinateur. La Recherche, 20, 206, 136-142.
- PETERSEN, H., & M. LUXTON, 1982 - A comparative analysis of soil fauna populations and their role in decomposition processes. Oikos, 39, 3, 288-388.
- PETRUSEWICZ, K., & A. MACFADYEN, 1970 - Productivity of terrestrial animals. Principles and methods. Ed. Blackwell sci. publ. Oxford, IBP Handbook, 13, 1-190.
- PIERRE, J.-I., 1870 - Etudes sur les engrais de mer. Ed. A. Goin, Paris, 1-219.
- PIMENTEL, D., 1980 Handbook of energy. Utilization in Agriculture. Ed. C.R.C. press., 1-496.
- PIMENTEL, D., D. ANDÜW, R. DYSON-HUDSON, D. GALLAHAN, S. JACOBSON, M. IRISH, S. KROOP, A. MOSS, I. SHREINER, M. SHEPARD, T. THOMPSON & B. VINZART, 1980 - Environmental and social costs of pesticides : a preliminary assessment. Oikos, 34, 126-140.
- POCHON, J., & H. de BARJAC, 1958 - Traité de microbiologie des sols, applications agronomiques. Ed. Dunod, Paris, 1-685.
- POPPER, K.R., 1973 - La logique de la découverte scientifique (trad. de "the logic of scientific-discovery). Ed. Payot, Paris, 1-480.
- PRACONTAL, M. de, 1987 - L'imposture scientifique en dix leçons. Ed. La Découverte, Paris, 1-257.
- PRIGOGINE, I., 1972 - La thermodynamique de la vie. La Recherche, 24, 547-562.

- RAMADE, F., 1984 - Eléments d'écologie, écologie fondamentale. Ed. McGraw Hill, Paris, 1-397.
- RAMADE, F., 1987 - Les catastrophes écologiques. Ed. Mc Graw Hill, Paris, 1-317.
- RAMBAL, S., & A. CORNET, 1982 - Simulation de l'utilisation de l'eau et de la production végétale d'une phytocénose sahélienne du Sénégal. *Acta Oecol. plant.*, 3, (17), 4, 381-397.
- RANC, D., 1980 - Mesure écologique de la température des lombriciens en prairie permanente par la méthode d'inversion du saccharose. DEA Ecologie microbienne, Univ. Cl. Bernard, Lyon 1, 1-54.
- RAO, C.R., 1980 - Matrix approximation and reduction of dimensionality in multivariate statistical analysis. In P.R. Krishnaiah (ed.) *Multivariate analysis V*, éd. North Holland Publ. Co., 3-22.
- RAPP, M., 1984 - The monthly cycling of nutrients in a stand of *Pinus pinea* L. In G.I. Agien (red.), *state and changes of forest ecosystems, indicators in current research*. Swedish univ. agric. sci. dept. ecol. environn. res., 13, 261-291.
- RAUNKIAER, C., 1905 - Types biologiques pour la géographie botanique. *Acad. roy. sci. lett. Danemark*, 5, 347-437.
- REGNER, A., 1974 - La crise du langage scientifique. Ed. Anthropos, Paris, 1-399.
- REICHLE, D.E., 1970 - Analysis of temperate forest ecosystems. Ed. Springer Verlag, New York, *Ecol. stud.*, 1, 1-304.
- REMANE, A., 1943 - Die Bedeutung der Lebensformtypen für die Oekologie. *Biol. gen.*, 17, 164-182.
- REMY, C., 1986 - L'intelligence artificielle dévoilée ou la logique floue. *Micro-système* (mai 1986), 93-105.
- RICOU, G., 1981 - Les chercheurs et les bases écologiques du développement. Demandes et réponses. In Anonyme "Ecologie et développement", (op. cit.), 25-30.
- ROBERT, P., & Y. ESCOUFIER, 1976 - A unifying tool for linear multivariate statistical methods : the RV coefficient. *Appl. statist.*, 25, 3, 257-265.
- ROBOTTI, C.A., 1983 - Genetic distances among european populations of *Eisenia fetida undrei* and *Eisenia fetida fetida*. *Att. assoc. genet. ital.*, 29, 207-208.
- ROUX, M., 1985 - Algorithmes de classification. Ed. Masson, Paris, coll. méthodes et programmes, 1-151.
- ROUX, M., & G.G. GUITTONNEAU, 1977 - Sur la taxonomie du genre *Krodiu*m. *Cah. anal. données*, 2, 1, 97-113.
- ROUX, M., & C. MONTANA, 1988 - Pondération des contributions en analyse des correspondances quand les nombres des modalités des variables diffèrent grandement : application en écologie. *Cahier anal. données*, 13, 4, 459-468.
- ROUX, C., & M. ROUX, 1967 - A propos de quelques méthodes de classification en phytosociologie. *Rev. stat. appl.*, 14, 2, 59-72.
- RUTTER, A.J., 1973 - Summary and assessment : an ecologist's point of view. In J.N.R. Jeffers "Mathematical models in ecology", éd. Blackwell sci. publ., Oxford, 375-380.
- SABATIER, R., 1983 - Approximations d'un tableau de données ; application à la reconstitution des paléoclimats. Thèse math. pure et appliquée, USTL, Montpellier, 1-184.
- SALLIH, Z., P. BOTTNER, G. BILLES & P. SOTO, 1987 - Interaction racines-microorganismes : carbone et azote de la biomasse microbienne développée en présence de racines. *Rev. écol. biol. sol*, 24, 3, 459-471.
- SAMIII, M., 1988 - Quelques problèmes spécifiques à la programmation non linéaire ; application à des problèmes écologiques. Thèse doct. spéc. math. pure et appl., USTL, Montpellier, 1-105.
- SAUGIER, B., 1970 - Transports turbulents de CO₂ et de vapeur d'eau au-dessus et à l'intérieur de la végétation. Méthodes de mesure micrométéorologiques. *Oecol. plant.*, 5, 2, 179-223.
- SAUVAGE, Ch., 1965 - Taxinomie ou taxonomie. *Bull. soc. bot. Fr.*, 112, 3/4, 180-182.
- SCEHOVIC, J., 1988 - Métabolites secondaires de quelques plantes de prairies. *Rcch. agronom. Suisse*, 27, 2, 153-165.

- SCHAERER, Y., 1983 - Entwicklung und Enprobung eines terrestrischen Modell-Oekosystems bestehend aus einer Vegetationskammer und einen Agrarökosystem-Modellausschnitt für quantitative ökoechemische Verhaltensstudien von Umweltchemikalien. Mitt. biol. Bundesanstalt. Land. Forstwirts., 215, 1-169.
- SCHERRER, B., 1984 - Biostatistiques. Ed. G. Morin, Chicoutimi, Québec, 1-850.
- SCHERRER, B., sous presse - Application et optimisation de l'échantillonnage probabiliste en écologie (multigraphié).
- SCILLAGETER, G., & W. STUCKY, 1977 - Databanksysteme : Konzepte und Modelle. Ed. Teubner, Stuttgart, 1-261.
- SCHROETER, C., & O. KIRCHNER, 1896, 1902 - Die Vegetation des Bodensee. Lindau (cité par Schwertfeger, 1977).
- SCHWARTZ, D., A. MARIOTTI, R. LAFRANCHI & R. GUILLLET, 1986 - $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of soil organic matter as indicators of vegetation changes in the Congo. Geoderma, 39, 97-103.
- SCHWERTFEGER, F., 1975 - Oekologie der Tiere. Synökologie. Ed. Paul Parey Verlag, Berlin, 1-451.
- SCHWERTFEGER, F., 1977 - Oekologie der Tiere. Autökologie (2 Auflage). Ed. Paul Parey Verlag, Berlin, 1-460.
- SCHWERTFEGER, F., 1979 - Oekologie der Tiere. Demökologie. (2 Auflage) Paul Parey Verlag, Berlin, 1-452 (1ère ed. 1966).
- SCHWENKE, W., 1953 - Biozönotik und angewandte Entomologie. Beitr. Ent. 3 (Sonderheft), 86-162.
- SEBILLOTE, M., 1978 - Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. C.R. Acad. agric. Fr., 64, 906-914.
- SHANON, E.E., & W. WEAVER, 1949 - The mathematical theory of communication. Univ. Illinois press (cité par TONNELAT, 1977).
- SHIMIZU, M., 1976 - Instability of a highly reducing atmosphere on the primitive earth. Precambrian research, 3, 463-470.
- SILLANPÄÄ, M., 1982 - Micronutrients and the nutrient status of soils : a global study. FAO soil bull., 48, 1-444.
- SIMON, H.A., 1986 - Commentaires. In A. DEMAILLY & J.L. Le MOINGNE (eds) "Sciences de l'Intelligence, Science de l'Artificiel", Ed. presses univ. Lyon, 577-612.
- SIMPSON, G.G., 1961 - Principals of animal taxonomy. Ed. Columbia univ. press. New York, 1-298.
- SIMONNEAU, D., 1979 - L'écologisme. Ed. PUF, Paris, Que sais-je ?, 1784, 1-128.
- SIMS, R.W., 1980 - A preliminary numerical evaluation of the taxonomic characters of *Allolobophora* auct. and some allies (Lumbricidae, Oligochaeta) occurring in France. Pedobiologia, 20, 3, 212-226.
- SIMS, R.W., 1983 - The scientific names of earthworms. In J.E. Satchell "Earthworm ecology from Darwin to vermiculture", éd. Chapman & Hall, London, 467-474.
- SJORS, H., 1979 - What are the criteria of an environmental change - natural and man made ? In "The use of ecological variables in environmental monitoring", Swedish Environment Protection Board, SNV/PM 1151, 25-29.
- SKELLAM, J.G., 1972 - Some philosophical aspects of mathematical modelling in empirical science with special reference to ecology. In J.N.R. Jeffers "Mathematical models in ecology", Ed. Blackwell sci. publ., Oxford, UK, 13-28.
- SMITH, R.L., 1978 - Les remontées d'eau profonde, source de vie des océans. La Recherche, 9, 93, 855-863.
- SOTO, P., & M.B. BOUCHE, sous presse - ECORDRE : une Base de Données Relationnelles pour toutes données écologiques, y compris les actes humains. In C.R. réunion de travail internationale "Etudes pluridisciplinaires et systèmes d'information environnementale", Grenoble (France), 30-31 mai 1989.
- SOUTHWOOD, T.R.E., 1977 - Habitat, the templet, for ecological strategies. J. anim. ecol., 46, 337-365.
- SPANDAU, L., 1989 - Angewandte Oekosystemforschung im Nationalpark Berchtesgaden. (2ème édition) Nationalpark Berchtesgaden, Forschungsb., 16, 1-88.
- STUNGREN, B., 1965 - Ecologie generală (cu demente de ocotirea naturii). Ed. didact. pedagog., Bucuresti, 1-216.

- STUNGREN, B., 1978 - Grundlagen der allgemeinen Oekologie (3ème édition). Ed. Gustav Fisher, Jena, 1-312.
- STUNGREN, B., 1982a - Introducere. In B. Stungren (red.) "Probleme moderne de écologie" Edit.  tiint.  i. enciclop., Bucuresti, 73-81.
- STUNGREN, B., 1982b - Matematizarea  i dematematizarea ecologiei. In B. Stungren (red.) *op. eil.*, 73-81.
- STUNGREN, B., 1986 - Grundlagen der allgemeinen Oekologie (4ème édition). Ed. VEB Gustav Fischer, Jena, 1-356.
- SUESS, E., 1888 - Das Antlitz der Erde, Tomus II. Ed. Tempsky, Prag, & Fieytag, Leipzig, 1-212 (Traduction : La face de la terre,  d. Colin, Paris).
- SUKUTCHEV, V.N., 1947, - Osvovy teorii biogeocenologii. In "Jubilejnyj sborik posvojashtchennyi Velikoj Oktjabrskoj Socioalistiticheskoj Revolucii", 2, Izd. AN SSSR, Moscou-Leningrad, 283-305.
- SVENSSON, S., 1979 ■ Criteria for selection of variables for environmental monitoring. In "The use of ecological variables in environmental monitoring"¹ Swedish Environment Protection Board, SNV/PM 1 151, 37-47.
- TANSLEY, A.G., 1935 - The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 16, 3, 284-307.
- TARRADELLAS, J., 1986 - Ecotoxicological approach of pollution studies about PCB's in the lake Geneva (Lac L man). Abst. 16th ann. symp. on analytical ehem. pollutants. Ed.  cole polytechn. f d r. Lausanne, 37.
- TAUREAU, J.-C., & A. FONTAINE, 1987 - Influence de la gestion de pailles sur la libération et le devenir de l'azote minéral. In Anonyme "Nitrates et engrais verts". Ed. Comifer-Corpen, Ministère agric., Paris, doc. séparé, 1-10.
- TER BRAAK, C.S.F., 1987 - Ordination. In R.H.G. Jongman, C.S.F ter Braak & O.F.R. van Tongeren "Data analysis in community and lanscape ecology". Ed. Pudoc, Wageningen, 1-299.
- TUENEMANN, A., 1926 - Der Nahrungskreislauf im Wasser. *Verh. deutsch. Zool. Ges.*, 31, 29-79.
- THUILLIER, P., 1985 - Sociologie de la connaissance : Platon et la géométrie. *La Recherche*, 16, 664-667.
- T REL, J.C., 1987 - Intensification hier ? Exlensification demain ? Un essai d'analyse d'images sur clichés flous... Ed. INRA, dir. polit. région. (ISBN 2-85340-980-5), 1-98.
- TISCHLER, W., 1949 - Grundzüge der terrestrischen Tier kologic. Ed. Viewcɡ & Sohn, Braunschweig, 1-414.
- TISCHLER, W., 1951 - Der bioz notische Konnex. *Biol. Zbl.*, 70, 517-523.
- THOM, R., 1975 - La théorie des catastrophes et ses applications. In Anonyme "Réflexions sur des nouvelles approches dans l'étude des systèmes". Ed. Ecol. nat. sup. techn. avancées, Paris, 9-22.
- T.L.F., 1975 - Trésor de la Langue Française. Ed. CNRS, Paris, 4, 1-1166.
- TONNELAT, J., 1977 - Thermodynamique et biologie. Tome I : Entropie, désordre et complexité. Ed. Maloine-Doin, Paris, 1-237.
- TONNELAT, J., 1978 - Thermodynamique et biologie. Tome 11 : L'ordre issu du hasard. Ed. Maloine, Paris, 1-238.
- TOUFFET, J., 1982 - Dictionnaire essentiel d' cologie. Ed. Ouest-France, Rennes, 1-108.
- TOUTAIN, F., 1981 - Les humus forestiers, structure et mode de fonctionnement. *Rev. forest.*, fr. 33, 6, 449-464.
- TOUTAIN, F., 1984 - Les phénomènes de biodégradation et d'humification dans les écosystèmes forestiers tropicaux : rôle et conséquences de la diversité spécifique. *Biol. int., spec. issue*, 6, 19-29.
- TOUTAIN, F., 1987 - Jars litières : sièges de systèmes interactifs et moteur de ces interactions. *Rev. ecol. biol. sol.*, 24, 3, 231-242.
- TRABALKA, J.R., J.A. EDMONS, J.M. REILLY, R.H. GARDNER & D.E. REICHLE, 1986 - Atmospheric CO  projections with globally averaged carbon cycle models. In J.R. Trabalka & D.E. Reichle (reds.) "The changing carbon cycle ; a global analysis", Springer Verlag, New York, 534-560.
- TRABALKA, J.R., & D.E. REICHLE, 1986 - The changing carbon cycle ; global analysis. Springer-Verlag, New-York, 1-592.

- TROLL, C., 1966 - Oekologische Landschaftsforschung und vergleichende Hochgebirgsforschung. Ed. Steiner Wiesbaden, ser. Erdkundl. Wissen. Schriftfloges f. Forsch. u. Praxis, 2, (cite in Forman et Godron).
- TULLGREN, A., 1917 - Ein sehr einfacher Ausleseapparat für terricole Tierformen. Zeitschr. angew. Entomologie, 4, 149-150.
- TUREKIAN, K.K., & S.P. CLARK Jr., 1969 - Inhomogenous accumulation of the earth from the primitive solar nebula. Earth planet. sci. let., 6, 346-348.
- UEXKÜLL, J. von, 1921 - Umwelt und Innenwelt der Tiere. Berlin (cité par Sehwerfeger, 1977).
- VAN DYNE, G.M., 1973 - Organization and management of an integrated ecological research program - with special emphasis on system analysis, universities and scientific cooperation. In J.N.R. Jeffers (red.) "Mathematical models in ecology", éd. Blackwell sci. publ., Oxford, U.K., 111-172.
- VAN HOVEN, W., 1984 - Tree's secret warning systems against browsers. Custos, 13, 11-16.
- VANNIER, G., 1970 - Réactions des microarthropodes aux variations de l'état hydrique du sol. In FBI, RCP n° 40, Ecologie du sol, Ed. CNRS, Paris, 24-258.
- VENANT, A., L. RICHOU-BAC, E. GLEIZES, M. JUILLARD, M. TERRASSE & J.F. TERRASSE, 1984 - Contamination des oeufs de rapaces par les hydrocarbures organochlorés entre 1974 et 1980. Environ. pollut., (ser. B) 7, 179-191.
- VERHULST, P.F., 1838 - Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. Correspond. math. phys., 10, 113-121.
- VILA, J.P., 1982 - Méthodes d'identification des modèles dynamiques. In J.D. Lebreton & C. Millier (op. cit.), 171-195.
- VILLEMEN, G., & F. TOUTAIN, 1987 - Méthode de fixation d'échantillons organo-minéraux de sols pour la microscopie électronique à transmission. In N. Fedoroff, L.M. Bresson & M.-A. Courty (reds). Actes 7è réun. int. micromorphoi. sols, Ed. AFES, CNRA, Versailles, 43-48.
- WALDROP, M.M., 1984 - An inquiry into the state of the earth. Science, 226, 33-35.
- WALTER, H., & S.-W. BRECKLE, 1983 - Ökologie der Erde. Band I : Ökologische Grundlagen in globaler Sicht. Ed. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1-238.
- WAREMBOURG, F., 1977 - Les flux de carbone dans la végétation, la rhizosphère et le sol de formations herbacées marquées avec du C¹⁴. Thèse doc. d'état, USTL, Montpellier, 23/06/77, 1-163.
- WARMING, E., 1895 - Plantensamfund. Grundtræk af den økologiske Planlegeografi. Ed. Philipsens Forlag. (Lehrbuch der ökologischen. Pflanzengeographie. Ed. Gebrüder Borntraeger Verlag, Berlin, 2ème édition, 1902, 1-442).
- WARTERBURY, J.B., J.M. WILLEY, D.G. FRANKS, F.W. VALOIS, & S.W. WATSON, 1985 - A cyanobacterium capable of swimming mobility. Science, 230, 4721, 74-76.
- WEGENER, A., 1920 - Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. In : Die Wissenschaft. Ed. Vieweg Verlag, Braunschweig (cité in Michaelsen, 1922).
- WEIQIN, X., 1981 - A l'aube de la vie, la naissance du code génétique. La Recherche, 12, 125, 1000-1003.
- WIEGERT, R.G., & F.C. EVANS, 1964 - Primary production and the disappearance of dead vegetation on an old field in southeastern Michigan. Ecology, 45, 1, 49-63.
- WIENER, N., 1948 - Cybernetics. Ed. Wiley, New-York, 1-182.
- WILCKE, D.E., 1953 - Lieber die vertikale Verteilung der Lumbriciden im Boden. Z. Morphol. Oekol. Tiere, 41, 372-385.
- WILDI, O., 1986 - The relational model for data bases in community studies. Coenoses., 1, 29-34.
- WINOGRASKY, S., 1949 - Microbiologie du sol, problèmes et méthodes, cinquante ans de recherches - oeuvres complètes. Ed. Masson et Cie, Paris, 1-861.
- WITKAMP, M., 1971 - Soils as components of ecosystems. Ann. rev. ecol. syst., 2, 85-110.
- WITTAKER, R.H., S.A. LEVIN & R.B. ROOT, 1973 - Niche, habitat, and ecotope. Am. naturalist, 107, 955, 321-338.
- WITTAKER, R.H., & S.A. LEVIN, 1975 - Niche, theory and application. Benchmark papers in ecology, 3, Ed. Dowdin, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Penn., U.S.A., 1-448.
- WOESE, C.R., 1977 - A comment on methanogenic bacteria and the primitive ecology. J. molec. evol., 9, 369-371.

- WOLDEDORP, J.W., 1981 - Nutrient in the rhizosphere. Proc. 16th Coll. int. potash inst. "Agricultural Yield potentials in continental climate", Ed. Potash inst. Bern, 99-126.
- WOLLESEN, J., 1987 - La ricerca in agricoltura, agrobiologia ed agronomia : un esame critico di alcuni concetti basilari. Tesi di Laurea, fac. sci. agr., Univ. stud. Pisa, 1-61.
- WORTHINGTON, E.B., 1975 - - The evolution of IBP. Cambridge Univ. Press, London, Int. Biol. Prog., 1, 1-268.
- WYRTKI, K., 1979 - El Niño. La Recherche, 10, 106, 1212-1220.
- YU, O., G. GUNTZBERGER & M. GOUNOT, 1975 • Modèle de fonctionnement d'un peuplement de dactyle (*Dactylis glomerata* L.) en phase végétative. Approche morphogénétique. Oecot. plani., 10, 107-139.
- ZADEH, L.A., 1965 - Fuzzysets. Inform, conti., 8, 338-353.
- ZEEUW, D. de, 1988 - The limits to agriculture. Ecol. bull., 39, 13-16.
- ZEUTHEN, E., 1947 - Body size and metabolic rate in the animal kingdom. C.R. lab. Carlsberg, sér. chim., 26, 17-167.
- ZINNEL, K.C., & M.F. MAROZAS, 1986 • Computer data entry techniques used in scientific applications. In W.K. Michener (op. cit.), 61-72.

Connaissances relatives aux lombriciens

Cel ouvrage a souvent été illustré par des exemples familiers à l'auteur, c'est-à-dire relatifs à la géodrilologie - ou science des vers de terre. Il n'en est pas une synthèse mais en présente des éléments, dans une démarche écologique intégrée, avec des préoccupations agronomiques, environnementales et méthodologiques. On trouvera des informations relatives à leur taxonomie p. 180, 185, 255, 257, 258, 260, à leur classement en catégories écologiques p. 246, 418, 420, à leur mésologie p. 141, 208, 404, 419 et à leurs peuplements p. 145, 331, 333, 365, 392, 444. Leur activité dépend de leur niveau sous gestions anthropiques (p. 273, 410, 479, 489, 502, 518, 526) et des contraintes climatiques (p. 112, 141, 151, 208, 410, 420),-et se traduit par un rôle relatif aux éléments chimiques (p. 127, 128, 138, 149, 168, 302, 333, 347, 414, 418, 420, 482, 498, 518, 526), au travail et à la qualité des sols (p. 127, 128, 130, 142, 147, 150, 209, 223, 246, 274, 479, 488, 519, 526) et aux fonctions biocénétiques (p. 145, 151, 156, 482, 511, 518, 519).

Les connaissances écophysiologiques permettent une modélisation (p. 91, 113, 141, 144, 150, 209, 229, 246, 274, 302, 346, 392, 395, 404, 406, 410, 414, 418, 420, 426, 431) permettant son intégration (p. 321, 338, 347, 407, 410, 418, 420, 426, 431, 435, 438, 444, 464, 531) dans les connaissances relatives aux agro-écosystèmes et à leurs usages.

INDEX D'ÉCOLOGIE OPERATIONNELLE

Tout dictionnaire tend à fixer l'usage des mots et, simultanément dans une langue vivante, cet usage évolue.

Les sciences et techniques, grandes consommatrices de termes, n'échappent pas à cette règle ; il faut à la fois fixer pour clairifier et échanger mutuellement et à la fois évoluer pour tenir compte des situations nouvelles. Cette évolution sémantique peut s'effectuer selon deux procédés : 1) adopter un néologisme auquel est associé un nouveau concept, et 2) réaffecter à un mot pré-existant un sens nouveaux.

Située à la confluence de nombreuses disciplines, qui ont chacune de façon autonome élaboré leur vocabulaire par néologismes ou réaffectations, l'écologie est confrontée à un redoutable problème lexical. Elle hérite des divergences résultant de réaffectations disparates effectuées par des disciplines distinctes : elle a - se comportant en discipline isolée - utilisé par analogies approximatives des mots créés ailleurs avec un autre sens (p. 18).

Pour que l'écologie devienne opérationnelle - c'est-à-dire puisse s'élaborer *per se*, mais aussi manipuler l'information décrite avec une terminologie chimique, biologique ou physique traitant des systèmes écologiques, il lui faut nécessairement un minimum de concepts en propre. Il faut de plus que les mots soient distincts ; l'intelligibilité transdisciplinaire l'exige et de façon péremptoire l'intelligence Artificielle, car cette dernière ne tolère ni synonymie, ni homonymie.

Heureusement, l'écologie opérationnelle peut limiter ce vocabulaire à un nombre restreint de termes portant sur les systèmes écologiques en tant qu'objets ou que systèmes. Les opérations d'analyse, gestion, synthèses des connaissances sur ces systèmes-objets impliquent également une terminologie minimale.

On peut évidemment hésiter pour savoir ce qui est, ou n'est pas, dans cette "terminologie" minimale, quelques mots accessoires étant fort utiles, mais c'est en définitive 40 termes écologiques, 16 mots systémiques et 86 dénominations opérationnelles qui se sont avérés nécessaires. De plus 11 néologismes (**) et 7 réaffectations (') ont dû être introduits (pour les néologismes, cf. p. 30).

La terminologie, ainsi ordonnée et définie dans cet ouvrage, n'est évidemment qu'une proposition visant à permettre l'élaboration de la discipline : cette discipline utilisant par ailleurs les moyens des sciences exactes et de la mathématique (logique), dont leurs nomenclatures spécifiques, et de plus un vocabulaire additionnel fort abondant, qui peut s'avérer utile pour certains usages ou encombrant pour la communication. Il semble que seulement les 153 mots ou expressions conceptuellement précis et spécifiques, dénombrés ci-dessous, soient indispensables. Comparé aux millions de dénominations taxonomiques nécessaires pour l'inventaire en biologie ou même aux 103 éléments chimiques stables (sans prise en compte des millions de combinaisons moléculaires) ce vocabulaire est restreint et peut être maîtrisé.

Ce lexique comporte un vocabulaire technique ou scientifique usuel. Parmi ceux-ci les termes à fonction univoque sont en helvética, les néologismes et réaffectations sont signalées respectivement par deux et une astérisque. La page où le terme est défini, ou explicité, est en caractère gras ; les autres pages indiquées sont celles où le terme est notamment utilisé (d'autres usages existent). Gén = usage généralisé dans l'ouvrage.

- Aberration 289,315
 Abios 64,87,108,160,204
 Absorption : voir spectre d'
 Abstraction 43,391
 Acide aminé 78
 Acidité : voir pH
 ACP 372
 Acquisition (d'une donnée) 263,301,312,324, 406
 Acte (action humaine) 27,28,50,96,145,176, 182,21 1,272,324,352,393,458,472,477,481, 506,509
 Activité : voir fonction
 Adéquation (de données) 267,277,288,298, 397,445,454
 ADN 68,80,135,183,188,216,234
 ADP ; voir ATP
 Aérosol 60,118,121,124,155
 AFC 303,368,376,385
 Affinité 58,70
 Agronomie : voir agrosystème
 Agrosystème (agroécosystème) 503,509
Aire 218
 Ajout 302,365
Ajustement (d'un infosystème ou d'une fonction mathématique) 302,338,402
 Albedo : voir rayonnement
 Alcalinité : voir pH
 Aléas (aléatoire) 81,177,204,214,341
 Aléas mortifères 214
 Algorithme 5,102,366,401,416
 Aliquote 346
 Allèle 215
 Allotement ' (allotir) 268,286,363,366
 Alluvion 123
 Altitude : voir relief
 Amensalisme 224
 Ammoniaque, ammoniac : voir azote
 Anabolisme 79
 Analogique 271
 Analyse 35,39,267,283,394
 Analyse Canonique des Correspondances 373
 Analyse des données 367,373
 Analyse Factorielle des Correspondances : voir AFC
 Analyse Discriminante Décisionnelle 373,384
 Analyse Factorielle en Composante Principale : voir ACP
 Analyse fréquentielle 255
 Analyse multidimensionnelle 246,255,367
 Analyse multivariée : voir analyse multidimensionnelle
 Analyse ponctuelle : voir intrapolation
 Anécique 141,145,151
 Apomorphe 253
 Approximations successives : voir PRAC
 Argumentation *ad hoc* : voir explication, opportunisme
 Ascension (mouvement ascendant) 119, 127,155
 Assemblage 286,345,360,367,456,459
 Assimilation (assimilais) 84,gén.
 Assimilation chlorophyllienne : voir photosynthèse
 Assolement 505,519
 Association de prélévât (associateur) 265, 282,296
 Atmoclimate (atmoclimatique) 118,135,141, 210
 Atmosphère 74,1 10,120,130,195,495,514
 Atome (atomique) 53
 ATP 78,135,173
 Attribut 322,326,327,430
 Autécologie 191,196
 Auto-compétition (voir aussi compétition) 225,227
 Autotrophe : voir producteur
 Auto validation 416
 Axe (factoriel) 369
 Azote 110,117,124,149,332,415,419,479,489, 518,520,526
 Azote¹⁵ 53,338,347,415,419,483

 Base de Connaissances : voir BdC
 Base de Données Relationnelles : voir BDR
 Base de faits (voir aussi BdC) 309
 Base de règles (voir aussi BdC) 309
 Basicité (base) : voir pH
 BdC : voir Système-Expert
 BDR 30,266,281,285,296,310,319,351,360, Bilan 157
 Biocénose, biocénologie 154,163,192,221,218, 375
 Biocentrisme (biocentrique) 25,48,88,108,163, 191,197,201,235,237,240,450,468,497
 Biogéographie 197,221
 Bio-indication (bio-indicateur) 76,95,202,408, 496
 Biologie 201,gén.
 Biolytique (biolyse) 144,146,161,222,223,498
 Biomasse 85,gén.
 Biome 195
 Biosol 145,149,5 18
 Biorégion 194
 Biosphère 92,130,140,195,223,229,524
 Biostimulation 222,225
 Biotique : voir vie
 Bioturbation 130
 Biotope 92,192
 Brontement* 224,509

 Calibration (calibrer) 402,404,414
 Caractère 43
 Caractéristique 43,gén.

- Carbone 27,62,1 17,124,135,166,478,484,489,
 495,499,514
 Carnivore 161,230
 Carte 383,399
 Catabolisme 79,137
 Catastrophe écologique 475
 Catégorie écologique 245,326,333,360,408,418
 Cause 51,71,179,342,445,491,492,499
 Cénose 195,218
 Cénotope 195
 Chaîne trophique : voir réseau trophique
 Chaînon 159,163,221,223
 Chaleur (spécifique, latente, de réaction)
 (voir aussi énergie cinétique, température,
 thermodynamique) 64,113
 Champ écologique' 35,gén.
 Changement : voir transformation
 Changement d'échelle : voir échelle
 Cherauomasse" 87,143
 Chimiolitholrophe 111
 Chimique (réaction, liaison) 56,gén.
 Choix d'acquisition : voir option
 Choix d'objectifs : voir option
 Choix globalytique : voir option
 Chorologie 197,221
 Cinèse (cinétique) 44,gén.
 Cladismo 253
 Classe (classification) (voir aussi hiérarchie
 cumulable, comparaison) 338,348,349,364,
 367,377
 Classement 367,377
 Clé (d'un tableau) 282,328
 Climat 115,118,244
 Climax 107.223
 C/N 140
 Co-adaptation 229
 Code, Codification 363,366
 Co-évolution 228,503
 Cognétique, cognéticien(ne) 432
 Cohérence systémique : voir système
 Collecte (de données) 270,294
 Collection 272,291,313
 Colluvion 123
 Commensalisme 228
 Commentaire 26,335,337,349,478
 Comparaison 35,94,202,221,241,338,367
 Compartiment, compartimentalisation 85,156,
 91,272,392
 Compétition 69,177,204,225,227,350
 Complexité 31,66,67,72,130,206
 Composition 37,268,275,280,302
 Composant (système) 71,85,91,264,273,
 350,378,393
 Conceptualisation 18,30 l,gén.
 Confinement 475,483,501,503,507,527
 Connaissance 101,309,382,424,428
 Connexion (Connexité systémique) 93,96,163,
 202,216,288,349,358,377,392,398,405,408,427,
 534
 Consommateur 160,230
 Constat 491,496
 Continuité vitale 80,177,183,186,204,211,214,
 234,237
 Continuum 39,95,198,206,358,374,378,421,
 456,458,501
 Contraintes 204
 Contribution (à l'axe) 370
 Contrôle (contrôlable) : voir réfutation
 Conversion 86,268,345,365
 Coopération 144,161
 Coproduction 505,508,521
 Cote 270,277,291,320,464
 Couple d'oxydo-réduction, couple rédox : voir
 oxydo-réduction
 Couverture 287,349,447
 CC>2 : voir carbone
 Critère 345,361
 Critique scientifique : voir réfutation
 Croissance 253
 Cryoturbation 130,134
 CTR : voir contribution
 Cybernétique : voir information cybernétique
 Cycle coprodigestif 129,150,209
 Cycle d'éléments chimiques 109,156
 Cytosquelette : voir ultrastructure

Data lion 180
 Date' 38,366,gén.
 Débit 272,302,346,396
 Décision (voir aussi expert) 388
 Décideur 472
 Décomposeur 139,161,168,230
 Déduction 310
 Dégénération énergétique : voir exergonique
 Degré d'identité : voir identité
 Delta (isotopique) 54,135
 DEP 267,276,309,313,352,400,448
 Démécologie 197
 Démographie 197
 Démotope 195
 Demi vie (d'un élément quelconque) 415
 Dénitrification 172
 Dérivation (dérivé) : voir interception
 Descripteur 44
 Descriptif Technique (DT) 268,277,283,292,
 314,322
Désordre (voir aussi organisation) 67
 Diachronique (ensemble) 51,167,282,285
 Diagnose 346
 Diagramme 399,406
 Diapause 210
 DIC 266,gén.
 Diploïde 184,186,213
 Discipline : voir spécialiste

- Discrimination (écologique) 422,427,448
 Dispersion (des valeurs) 387
 Disponibilité des données : voir mobilité
 Distribution (des prélèvements) 270
 Diversité 387,485,506
 Donnée 89,264,266,283
 Donnée brute 290,348
Donnée continue 291,348
 Donnée Expérimentale sur les Potentialités : voir DEP
 Donnée fortuite 285,301,323,447
 Donnée Initiale Contrôlée : voir DIC
 Donnée objective : voir DIC
 Donnée qualitative 348,367,388
 Donnée quantitative 348,367
 Donnée Secondaire Elaborée : voir DSE
 Donnée semiquantitative 454
 Donnée supplémentaire 366,371,499
Dormance 210
 Drain, drainage 123,520
 Drilosphère 149,153
 DSE 41,266,302,338
 DT : voir Descriptif Technique
 Dualisme (anachronique) 455
 Duplication fonctionnelle 185
 Durée 38,272
 Dynamique : voir transformation
 Dynamique des populations 46

 Eau 59,109,209
 Ecart-type 302,387
 Echantillon (échantillonnage) 270,279,285,288, 300,349,386,439,442,446
 Echelle (changement d'échelle) 32,456
 Ecobiologie" (écobiologiste) 48,201,496,522
 Ecologie 20,gén.
 Ecologie appliquée (= finalisée) 27
 Ecologie cinétique 48
 Ecologie discriminante 106,422,437,443,455, 457,482,508,526
 Ecologie fondamentale (= de base) 27
 Ecologie fonctionnelle : voir écophysiologie
 Ecologie opérationnelle 28,37,98,176,242,424, 525
 Ecologie spéculative (voir aussi histoire naturelle) 98
 Ecologisme 21,468,476,524
 Ecologiste 21,539
 Ecologue 21,gén.
 Ecorne 34,51,194,508
 Economie : voir socio-économie
 Ecophase 207,212,215,260,498
 Ecophysiologie 48,51
 ECORDRE 293,321,332,361,456,494
 Ecosphère 195,gén.
 Ecosystème 51,107,154,160,176,192,382,391, 423,501,508
 Ecolone : voir continuum

 Ecotoxicologie 385,480,401,484
 Ecovalidation" 99,344,394,401,4 17,453,483
 Effet 28,51,342,491,492,499
 Effet de serre 115,175,495
 Elaboration (de l'écologie) 261
 Elaboration (du métabolisme) 84
 Élément biogène 116,141,144,154,165
 Élément chimique 54,gén.
 Élément de transit : voir transit
 Élément d'un tableau 360,365
 Elimination (de données) 363
 Elucubration 346
 Emanation (émanat) 84,163,479,502
 Emanation radiative 84
Emission : voir spectre d'émission
 Emission radioactive : voir radioactivité
 Endentère 129,246,397
 Endergonique 58,65,134
 Endosymbiose 186,188
 Energie 57,64,480,520
 Energie biochimique 75,79,86,133,138,160,165, 168,175
 Energie cinétique 67
Energie libre 65
 Energie liée 65
 Enregistrement (des données) 291
 Ensemble en transit : voir transit
 Ensemble (de données) 264,283,285
 Enthalpie 65
 Entité 339,345,361
 Entour' 32,65,93,177,280
 Entreprise 473
 Entropie 65
 Environicien 21
 Environnement 21,32
 Environique 21,468,476,516,524
 Enzyme 78,84,125
 Equitabilité : voir régularité
 Erosion 122,478,488,499,5 12,520
 Erreur 288,389,410
 Espace 403
 Espèce 187,254,374
 Essai 324
 Estimation 386
 Etat 44,67,156,288
 Etude comparative : voir comparaison
 Etude systémique : voir systémique
 Eucaryotes 81,188,214,228
 Eutrophisation 156,173
 Evaporation (évapotranspiration) 121,130, 134
 Evolution (voir aussi transformation) 24,47, 177,204,350
 Excrément : voir fèces
 Excrétion (excrétât) 84,128,137,145
 Exergomque 65,78,84,133,161
 Exhalaison 85
 Exnéat" 28,96,177,182,21 1,272,392

- Expérimentation (expérience) 50,351
 Expert 102,254,342,360,384,388,415,428,488
 Exo-enzyme : voir enzyme
 Explication opportuniste, *ad hoc* 26,42,180, 229,239,352
 Exsudat 135,145
 Extrait 97,162,475,503
 Extrapolation 47,277,286,346,359,4 18,493,502

 Facteur (écologique, limitant) 124,164,206,370
 Factuel : voir fait
 Faisceaux (de transit) 158
 Fait 24,309,397
 Fèces (fécal) 127,150
 Fertilité 486
 Fichier 3 15,341
 Fixation d'azote 171
 Flexibilité des protocoles 301
 Flou 348,367,430
 Flux 82,272
 Focalisation 356,439
 Fonction 48,gén.
 Fonction mathématique 346,365,368
 Force : voir interactions
 Formalisation (voir aussi conceptualisation) 98,156,176,334,399,405
 Formatage (des données) 345,362,408
 Forme : voir état
 Formes normales 296,320,328
 Fossile 74,178,179
 Fréquence 302
 Fusion (de données) 365

 Galerie 146
 Gaz carbonique : voir carbone et CO₂
 Généalogie : voir phylogénèse
 Généralisation : voir inférence
 Générat^r 96,177,272,392,401
 Génome, génotype (y compris message génétique) 80,214,183,236
 Genre 257,266
 Géosphère 109
 Gestion (des connaissances) 33,334
 Gestion (des données) 285,296,325,334
 Global (globalité) 31,41,304,403
 Globalyse^r, globalytique 37,gén.
 Gravité : voir interaction gravitationnelle
 Guilde 195

 H⁺ voir proton
 Habitat 218
 Haploïde 186,190,213
 Hasard 301,386,447
 Hémicycle énergétique 156,174
 Herbivore (herbivorie) 141,164,230,319,351
 Héritage (héritance) 431
 Hétérogénéité (voir aussi continuum) 39,280
 Heuristique 102,301,309,342,392,401,415,544

 Hiérarchie cumable 94,193,250,296,318,338, 372,374
 Hiérarchie systémique 94,404
 Histoire naturelle 23,239,352
 Holistique : voir inférence
 Holocénose 34,193,195,379,4 21,423
 Homéostasie 77,207,209,214,234
 Homéotherme 208
 Homogénéité 39,280
 Humidité : voir eau
 Humus (humification) 138
 Hydroascension 119,123,156
 Hydrocinèse 122,130
 Hydrogène, ion H⁺ : voir proton
 Hydrogène, liaison hydrogène : voir Van der Waals)
 Hydrophile 60
 Hydrophobe 60
 Hydrosphère 121,154,195
 Hypothèse 24,333,336,389
 Hypothèse nulle 389
 Hypothèse opérationnelle 347

 I.A. : voir Intelligence Artificielle
 Identique, Identité, Identification, Identifiable 338,417,428
 Identificateur 282,296,328,366
 Imbibition 123,520
 Impasse éditoriale 315
 Imprécision : voir précision
 Inadéquation : voir adéquation
 Indicateur 360,365
 Indicateur (d'un tableau) 360
 Individu 84,89,95
 Induction : voir inférence
 Inférence (voir aussi modélisation, statistique stochastique, moteur d'inférence, globalisation! 41,277,289,310,337,339,342,345,384, 397,429
 Information (générale) 88,328
 Information biologique 238
 Information culturelle 90
 Information cybernétique 89
 Information écobioécologique 90,234
 Information écologique 31,89,154,265,352,452
 Information fossilisée : voir fossile
 Information génétique : voir génome
 Information opérationnelle 90,369
 Informatique classique 102,231,268,341,356, 441,529,534
 Informatique moderne 102,341,356,441,465
 Infosystème, infosystémique 94,97,99,160,313, 339,346,401
 Infosystème Spatiotemporel Ecologique à Compartiments : voir ISTE
 Inhalation 85,135,159
 Inné^l 38,86,92,96,131,154,177,182,393,509

- Innovation évolutive (voir duplication fonctionnelle) 184,186,207
 Intégration 19,199,308,321,441,448,501,538
 Intelligence Artificielle (I.A.) 102,260,337,356,362
 Interaction biotique 221,225,232
 Interaction électromagnétique (voir aussi Van der Waals) 119
 Interaction faible : voir radioactivité
 Interaction gravitationnelle 119
 Interception 271,324
 Interception biologique 128,223
 Interception-relevé 271,324
 Interception-prélèvement 270,272,324
 Interdisciplinaire : voir spécialiste
 Interface Igéno-, méso-, démo-/individuelle) 234
 Interpolation 193,234,277,286,289,338,346,359,408,420,493,503,511
 Interprétation (voir aussi synthèse, explication) 334,335,355
 Intrapolation 95,131,193,270,277,279,287,378,423,494
 Intrans 97,162,475,487,503,530
 Inversion de perspective 5,263,441,443,478,533,535
 Ionosphère 121
 Isotope 57,149,274,397,407
 ISTE 90,100,403,423,438
 Itinéraire technique 506
- Jour (journalier) 196,209
- Khi-carré 370,389
 Krigeage 287,382,348
- Langue 305
 lessivage 122,130
 Léthargie 207,210
 Liaison chimique (biochimique, ionique, covalente, métallique) : voir chimique
 Liaison hydrogène : voir Van der Waals
 Lien 265,gén.,296,310
 Lieu 85,221,293,296,327
 Lipophile 60
 Liquide 60
 Lithosphère 195
 Lixiviation 122,130,139
 Ugiel 309,315,317,328,428,431
 Ixrgique déterministe 349
 Logique floue 349
 Logique probabiliste 349
 Logistique (fonction) 413
 longueur d'onde : voir rayon
 Lot" : voir allotement
 Lumière 111
- Maintenance 182
- Marquage 273,4 14
 Masse atomique 54
 Matière-énergie 53,73
 Matrice 337,345,360,367
 Médiation 276,279,280,289,294
 Mésologie 22,191,197,221,524
 Mésonèats 96,198,211,393
 Métabolisme 78
 Métabolon 82,157,201,222,230,374,501
 Métastable 67,182,392
 Microcosme 153,232,267,269,345,352,400,477,485
 Minéralisation 79,514
 Minéralomasse 87
 Milieu 20,21,22,32,127,129,191,223,235,
 Mise en forme (de données) : voir formatage
 Mobilité des données 314,316,329
 Mobilité individuelle 206,215
 Modèle 43,356,393,gén.
 Modèle conceptuel 99,160,352,399,477
 Modèle didactique 399
 Modèle factuel (voir aussi fait) 396
 Modèle spéculatif 25,396
 Modélisation 390,gén.
 Moder 142
 Monère 78,81,188,161
 Monotope 195
 Mor 142
 Morphologie 44,90
 Morphologie fonctionnelle 47,382,501
 Moteur d'inférence 311,431
 Motivation (d'une donnée) 288,294,296,313
 Mouvement : voir mobilité individuelle et cinèse
 Moyenne 302,387
 Mull 141
 Muséum 291
 Mutation (mutabilité) 206,214
 Mycélium 126
 Mycorhize : voir symbiote
- Naturaliste : voir histoire naturelle
 Nécromasse 86,130,137,139,148,166,479
 Nécrose 136,159
 Négentropie 68,90,94
 Néologisme 19,30
 Neutralisme 222,225
 Niche 219
 Nitrate : voir azote
 Niveau de globalyse : voir globalyse
 Niveau d'observation 33,35,304,375,393,423
 Niveau de perception 33,306
 Niveau trophique 158,161
 Nomenclature biologique 258
 Non-paramétrique 388,389
 Normalisation de relations : voir formes normales
 Nucléaire (noyau atomique, réaction) 54

- Nuisible 480,499
 Nycthéral : voir journalier

 Objectif (d'acquisition) 267,324,392
 Objectivité 298,374,394
 Objet 51,93,282,338,357,431
 Obscur (obscurantisme) 349
 Observation 274,351,455
 Observation provoquée 274
 Observation recoupée : voir recoupement
 Observation réitérée 351
 Observatoire 492,493
 Ontogénèse 207,211
 Opérationnel : voir écologie opérationnelle
 Opportunisme : voir explication opportuniste
 Optimisation opérationnelle
 Option 41,231,235,263,267,276,283,313,334,401,443,492
 Ordre : voir organisation
 Organisation" 79,135,139,229,5 J 4
 Organisation 72,80,360
 Organite ; voir ultrastructure
 Osmotrophe 163,224,228
 Oxydant, oxydation : voir oxydoréduction
 Oxydoréduction 60,75,79,125,139,175,133,165,188
 Oxygène 110,125
 Ozone 1 10

 Paléontologie 221
 Paradoxe systémique 45,139,425
 Para-écologie 25,394,397,452
 Paramètre (paramétrique) 386,402,416
 Parasitisme (parasite) 224
 Parcelle 501
 Parcellisé : voir sectoriel
 Pas : voir portée
 Paysage 198
 Pédoclimat (pédoclimatique) 118,141,153,210
 Pédogénèse 131,182
 Perception : voir niveau de perception
 Percolation 122,520
 Périhélie : voir soleil
 Pesanteur : voir interaction gravitationnelle
 Pesticide 27,479,480,499,501,517
 Peuplement 195
 pH 57,125,136,169,173
 Phagotrophe 127,144,157,163,222,230
 Phénotype 213,236
 Phorésie 2 1 1
 Phosphore 173,518
 Phosphorilation oxydative : voir ATP
 Photo 325,329
 Photopériode 208,419
 Photorespiration 136
 Photosynthèse I 19,133,157,174,229
 Phylogénèse 182,190,204,242,251
 Phylum 251

 Physiologie 48
 Phytosociologie 198
 Phytophage 161
 Phytotonutriments 137,139
 Pieu 34,93,131,193,198,277,423,508
 Pictel 323,513
 Place (écologique) 205,218
 Placette 272,293,296,323,327
 Plan d'échantillonnage : voir échantillon
 Plante C3, C4, CAM : voir photosynthèse
 Pléiomorphe 253
 Plot 293,296,323
 Poikilohydrique 141,161,209
 Poikilotherme 141,161,208
 Point : voir intrapolation, prélèvement ponctuel
 Polymorphisme 212,213,214,216,269
 Polypléidie 185,213
 Population 195
 Pore 130
 Porosphère 116,1 18,122,130,154,182,223,418
 Portée (d'une donnée) 289,291,384
 Portée (d'une théorie) 241,390
 Possibilité 349,433
 Potentialité 31,143,177,247,309,352,398,452,477,482,484,527
 Potentiel rédox : voir oxydoréduction
 FRAC 25,132,176,242,254,265,324,357,367,390,4 17,424,448,454,462,472
 Prébiotique : voir protobiotique
 Précipitation 121
 Précision 289,324,445
 Prédateur 224
 Prédicat 335,345, 412
 Prédicibilité 416,483,485,493,496
 Prédiction : voir prévision
 Prédonnée 266,267,280,348
 Pré-informatique 102,341,356,441,529,534
 Prélèvement 268,269,275,296,439
 Prélèvement cartésien 270,277,286
 Prélèvement coté 277,281,286
 Prélèvement euclidien 270,277,281,286
 Prélèvement informe 277,281
 Prélèvement instantané 276,281
 Prélèvement ponctuel (voir aussi point) 93,270,279,287
 Prélèvement 270,324
 Prémodèle 399,437
 Pression 58,65,75,110,115
 Prévision 346,481,494
 Prise (collectée) 269,271,300
 Probabilité, probable : voir statistique
 stochastique
 Problématique 40,267,301,357,437
 Procaryote : voir monomère
 Procédure 309
 Procédure ponctuelle : voir intrapolation
 Processus Répétitif d'Accroissement des Connaissances : voir PRAC

- Producteur 133,157,161,229
 Prognose 546
 Prolificité 214
 Proposition 25,41,231,266,298,334,338,344, 360,492
 Proration 333,345,365
 Protéine 81
 Protobiotique 74,187
 Protocole 300,301
 Proctotisme 82,134,229
 Proton 53,79,133,126
 Proximal (à l'homme) 28,43,52,333,534
 Publication 299
 Puissance (d'un test) 389

 Quantum 55
 Quasi-expérience 351
 Quiescence 207,210
 Q10 113,208,420

 Racine (racinaire) 145
 Radiatif, radiation 84,120,156,223
 Radioactivité 54,61,119,274,
 Rapport isotopique 54,180
 Rayon (rayonnement) 55,111,1 13,119,175,
 Réaction chimique : voir chimique
 Réaction (non)couplée 84,157
 REAL 321,392,406,410,418,451
 Réalisation 324
 Réalité écologique : voir information éco-
 logique
 Recoupement 180,352
 Redondance 328,358,378
 Réduction (chimique) : voir oxydoréduction
 Réduction (réductionnisme) : voir sectoriel
 Réductionnisme historique 30,43,240
 Réel : voir information écologique
 Référendaire" 37,71,179,180,275,296,322,423
 Référentiel (des données) 37,94,259,296,307, 322,455
 Réfutation, réfutabilité, réfutable 25,180,236, 299,307,335,394,428,453
 Régularité 288
 Relation (voir aussi lien) 21,313,319
 Relevé 269,324
 Relief 1 15,122,196
 Rendement 157
 Renouvellement (d'un compartiment) 45
 Réorganisation** 79,139,166
 Repère 293,296
 Reproduction 77,95,177,183,201
 Requête 317,325,329,361,406
 Réseau trophique 84,158,161,221,229,498
 Résistance à la décomposition 86,144
 Résosol 145,483
 Respiration 49,84,136,397,452
 Résultat (de la recherche) 299,305,307, 335,349

 Restrictif : voir sectoriel
 Rétroaction 81,88,96,98
 Rhizomorphe 126
 Rhizosphère 146,501,518
 Richesse 387,485,487,489
 Rigidité : voir flexibilité
 Risques environnementaux 475,477,483
 Risque (à l'interprétation) : voir réfutable
 Robuste (test) 389
 Roche 115
 Rôle (écologique) 222
 RV (coefficient) 379,425,443,477

 Saisie (de données) 290,296,312,364
 Saison 112,115,119,196,208
 Satellite : voir télédétection
 Science exacte 20,28,104
 Science humaine (voir aussi socio-économie) 27
 Sectoriel, séquentiel 118,157,235,237,341,344, 355,438,450,489
 Sédiment (sédimentation) 123
 Ségrégation isotopique : voir isotope
 Sélection (biologique) 177,183,486
 Sélection (de données) 365
 Semi-quantitatif 454
 Séparation isotopique : voir isotope
 Série statistique 384,387
 SE, SEOO : voir Système-Expert
 SGBD(R) : voir BDR
 Simulation 346,414
 Situation (d'un prélèvement) 269,275,292,296, 403,405
 Socio-économie 27,96,104,467,468,472,477,525
 Sol : voir porosphère
 Soleil 111,115,119,159,174
 Solide 58,115
 Solution 60
 Soufre 173
 Sous-espèce 258
 Sous-prélevat 276
 Sous-système 91
 Spécialiste, spécialité, spécialisation 191,199, 200,342,460
 Spéciation (biologique) 187,254
 Spectre (d'émission, d'absorption) 55,114,134
 Stabilité structurale 149
 Stable : voir métastable
 Statique : voir morphologie
 Statistique 339
 Statistique descriptive 339
 Statistique probabiliste : voir stochastique
 Statistique stochastique 339,441
 Stéréochronique (ensemble) 282,283,285,288
 Stratégie 71,248
 Structure 43,47,80,92,131,207
 Subécosystème 192
 Succession 233

- Supposition 280,313,344,349,448
 Supputation 24,4 1,170,232,377,346
 Surpopulation 177,183,203,214
 Sursystème 92
 Symbiose (symbiote) 188,228,500,518
 Synchronique (ensemble) 214,282
 Synécosystème 192
 Symmétaholon : voir métabolon
 Syntégro * 192,201,404,423,500
 Synthèse (chimique) (biochimique) 134
 Synthèse (synthétique) 334,335
 Synthèse opérationnelle 199,335,355,385,393
 Synusie 195
 Systématique 250
 Système écologique 91,96,98,119,232,337,475
 Système-Expert
 30,102,232,260,310,321,342,383,
 407,428,431,442,489,494
 Système de Gestion de Base de Données
 Relationnel : voir BDR
 Système, systémique 35,91,107,156,176,182,
 339,350,357,378
 Systémon 51,85,91,156,338,393,402

 Tablation, tablatoire 268,285,345,360,378
 Tableau 320,326,331,360
 Tableau de contingence 366,368
 Tableau disjonctif 366,368
 Tanin 168
 Tautologie (tautologisme) 33,42,180,237,238
 Taxinomie 250,358,367,374,376
 Taxocénose 195
 Taxon 85,251
 Taxonomie 215,250
 Tectonique 123,354
 Télédétection 291,323,513
 Télémétabolisme 87,125,129,153,158,163,222,
 Température 113,208,404
 Temps 35,38,403
 Test (testable) 25,389
 Théorie 25,105,240,335,391,451,461,537

 Thermodynamique 64,67,119,122,156
 Thermogencse 208
 Toposphère 195
 Traceur 53,274
 Traitement, interprétation (des données)
 (voir aussi interprétation, synthèse) 288,299
 Transcription 81
 Transfert 163
 Transit 84,157,163,501
 Transformation 47,156,177,182,273,365,403
 Transposabilité, transposition 392,398,417,426
 Travail 64
 Troposphère 175
 Type écologique 161,244
 Type d'humus 14 I
 Typologie 95,221,279,286,338,349,374

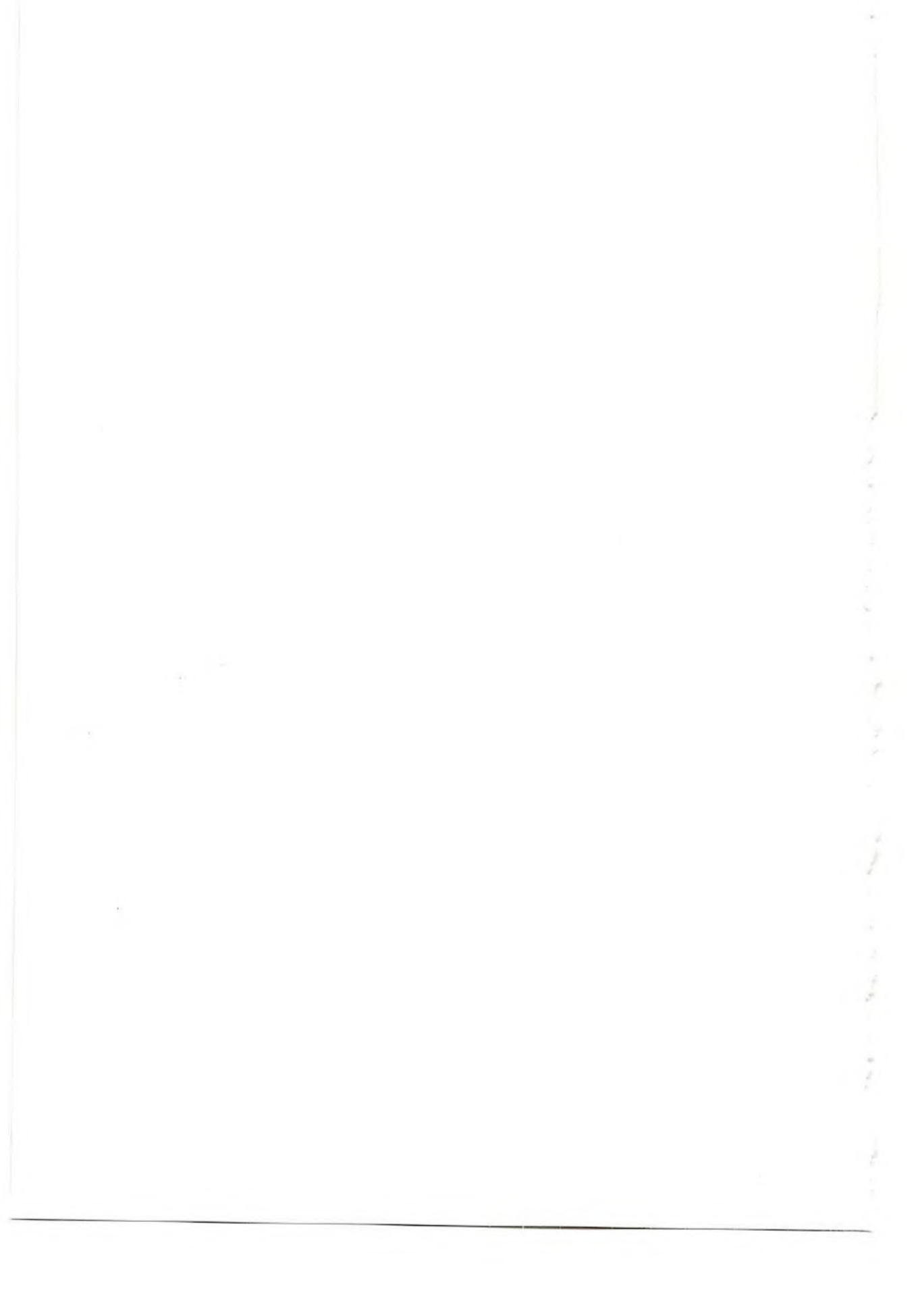
 Ultrastructure 81,188
 Undulapodium 144,188

 Vacuité (des connaissances) 442,457,482
 Valeur 360, gén.
 Validation (validité) : voir réfutation
 Van der Waals (forces de) 58,75,119,122,209
 Variable 360
 Variable active 366,371
 Variable d'ambiance 405,407
 Variable d'entrée 405,407
 Variable de sortie 405
 Variable supplémentaire : voir donnée
 supplémentaire
 Variance 387
 Variété 258
 Vérification (vérifiable) : voir réfutable
 Vicariance : 248
 Vie 48,63,108,118,190,204,234
 Volatilisation 139
 Vue 325

 Zoomage : voir focalisation

MASSON. Éditeur
120, boulevard Saint-Germain
75280 Paris Cedex 06
Dépôt légal : Septembre 1990

IMPRIMERIE LOUIS-JEAN
av. d'Embrun, 05002 — Gap
Dépôt légal : 503 — Juillet 1990



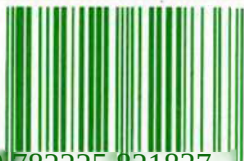
ÉCOLOGIE OPÉRATIONNELLE ASSISTÉE PAR ORDINATEUR

M. BOUCHÉ

Les difficultés locales, régionales, nationales ou planétaires résultant de nos actes vont croissant avec la puissance utilisée via les moyens chimiques (pesticides, engrais,...), physiques (mécaniques, nucléaires, grands travaux,...) ou biologiques (monocultures, cultivars, biotechnologies,...). L'appréciation effective de ces actes agissant sur les systèmes spontanés complexes est présentement réduite à l'étude de quelques variables sélectionnées depuis le jugement sectoriel de quelques spécialistes. Malgré une demande sociale forte pour une connaissance globale des effets de nos actes, l'absence de moyens d'intégration a rendu celle-ci impossible.

L'ouvrage démontre que, grâce aux progrès de l'intelligence artificielle, l'écologie, cette science globale proximale de l'homme, peut et doit aujourd'hui être mise en œuvre. Elle est dorénavant pleinement opérationnelle moyennant une réévaluation rigoureuse de ses pratiques et de ses moyens comme science exacte indispensable et permet donc les études tant fondamentales qu'appliquées dans notre environnement. Cet ouvrage concerne tous les acteurs agissant ou étudiant notre milieu. L'agronome, le forestier, l'aménageur ou le gestionnaire y trouveront le moyen d'accéder aux connaissances intégrées indispensables aux décisions qu'ils doivent prendre. Le biologiste y trouvera une évaluation de la place des organismes dans les écosystèmes.

Marcel BOUCHÉ, docteur ès sciences, directeur de recherche à l'INRA, dirige le laboratoire de zooécologie du sol au Centre d'écologie du CNRS à Montpellier. Il est président de la sous-commission de zoologie de l'Association internationale des sciences du sol et secrétaire de la section de zoologie du sol à l'Union internationale des sciences biologiques. Il étudie depuis 25 ans le rôle écologique, agronomique et environnemental des lombriciens tout en optimisant sa pratique avec les moyens informatiques disponibles.



9 782225 821837

ISBN : 2-225-82183-6