



Bioclimatologie

Concepts et applications

Bioclimatologie

Concepts et applications

S. de Parcevaux et L. Huber

Éditions Quæ
c/o Inra, RD 10, 78026 Versailles Cedex

Collection Synthèses

Bioclimatologie. Concepts et applications,
Sané de Parcevaux, Laurent Hubert,
2007, 336 p.

Plantes transgéniques : faits et enjeux,
André Gallais, Agnès Ricroch,
2006, 304 p.

L'agronomie aujourd'hui,
Thierry Doré, Marianne Le Bail, Philippe Martin, Bertrand Ney,
Jean Roger-Estrade, coord.,
2006, 384 p.

Reproduction sexuée des conifères et production de semences
en vergers à graines,
Gwenaél Philippe, Patrick Baldet, Bernard Héois, Christian Ginisty,
2006, 572 p.

La photosynthèse
Processus physiques, moléculaires et physiologiques,
Jack Farineau, Jean-François Morot-Gaudry,
2006, 412 p.

L'armillaire et le pourridié-agaric des végétaux ligneux,
Jean-Jacques Guillaumin, coord.,
2005, 504 p.

*« L'homme est capable de parvenir à une conception unifiée
et organique du savoir... La fragmentation du savoir
entrave l'unité intérieure de l'homme contemporain,
parce qu'elle entraîne une approche parcellaire de la vérité et que,
par conséquent, elle fragmente le sens...
La vie humaine et le monde ont en effet un sens
et sont orientés vers leur accomplissement... »*

J.P. II., Foi et Raison.

Table des matières

Avant-propos	1
Introduction	3
Définition et place de la bioclimatologie.....	3
Domaine et particularités de la bioclimatologie.....	4
Constitution et organisation de l'espace.....	5
Homogénéité et hétérogénéité de l'espace.....	5
Organisation spatio-temporelle	5
Quantité et qualité : énergie et information.....	7
Systèmes et interfaces	7
Structure, évolution et fonctionnement des systèmes	8
Réflexions épistémologiques.....	9
Laboratoire ou conditions naturelles	9
Globalisme et réductionnisme	10
Régime permanent, variable et transitoire	11
Stratégies et tactiques adaptatives.....	11
Modélisation	12
1. Transferts d'énergie par rayonnement	
Généralités.....	15
Nature et qualité du rayonnement	15
Interaction des rayonnements et de la matière.....	17
Phénomènes élémentaires	17
Réflexion : albédo, couleur.....	17
Transmission : transparence, opacité, diffusion	19
Absorption et émission : lois du rayonnement	23
Hyperfréquences ou micro-ondes.....	28
Quelques définitions concernant le rayonnement	28
Mesure du rayonnement.....	30
Principes et appareils.....	30
Détecteurs thermiques.....	30
Détecteurs quantiques	34
Détecteurs hyperfréquences.....	34
Unités.....	34
Unités énergétiques.....	35
Unités photométriques.....	35
Unités photoniques	36

Résultats.....	37
Constante solaire	37
Causes des fluctuations du rayonnement solaire reçu au sol.....	37
Causes astronomiques : distance terre-soleil,	
Déclinaison et équation du temps	37
Causes atmosphériques : extinction et ennuagement	37
Fluctuations du rayonnement solaire et de la durée d'insolation	42
Variations des rayonnements de grandes longueurs d'onde.....	42
Bilan du rayonnement : effet de serre.....	46
Rayonnement net	46
Bilan général	47
Effet de serre.....	47
Importance biologique et agronomique du rayonnement	49
Interactions du rayonnement et des systèmes vivants	50
Rayonnement et feuille.....	50
Rayonnement et couvert végétal.....	51
Effets des brise-vent sur le rayonnement	54
Pénétration du rayonnement dans le pelage	56
Importance écologique de l'éclairement et adaptation à l'ombrage...	56
Phototropisme.....	57
Photopériodisme.....	58
Lumière et différenciation des stomates.....	60
Éclairage artificiel et croissance des plantes	61
Applications agronomiques de la télédétection	62
Signification des mesures.....	62
Indices de végétation : biomasse et rendement.....	64
Hyperfréquences, végétation et sol.....	65
Conclusion	66
Exercices.....	67

2. Transferts dans l'air : vent

Généralités.....	69
Circulation atmosphérique	69
Caractéristiques et composition de l'atmosphère	69
Pression atmosphérique : cyclone et anticyclone	72
Forces s'exerçant sur une particule d'air.....	73
Structure de l'atmosphère : couches limites	76
Nature de l'écoulement au voisinage d'une surface	79
Convection.....	83
Processus des transferts atmosphériques	86
Transferts en air calme par diffusion des constituants	87
Transferts turbulents de la surface à l'atmosphère.....	93
Mesure.....	98
Mesure de la pression	98
Mesure de la direction et de la vitesse du vent	100
Les anémomètres soniques.....	101
Les anémomètres thermiques	102

Les anémomètres laser à effet Doppler.....	102
Les anémomètres à pression dynamique.....	103
Les anémomètres dont le capteur utilise l'énergie cinétique de l'air	103
Mesure des flux turbulents au-dessus d'un couvert végétal.....	104
Mesure des fluctuations.....	104
Mesure des gradients.....	106
Variations de la vitesse du vent dans la biosphère.....	107
Échelle locale.....	107
Profils.....	107
Turbulence.....	109
Échelle du paysage.....	111
Échelle régionale.....	113
Importance agronomique.....	114
Dégâts dus au vent.....	114
Érosion éolienne.....	114
Effets sur les végétaux.....	119
Transport des particules d'origine biologique (graines, spores, pollens)	123
Généralités.....	123
Dispersion atmosphérique des bioaérosols à l'échelle locale (1 m-1 km).....	124
Dispersion des spores par éclaboussement de gouttes de pluie (échelle : 1 cm-1 m).....	126
Dynamique et impact de polluants gazeux à l'interface biosphère- atmosphère.....	127
Brise-vent et bocage.....	130
Effets d'un brise-vent isolé.....	130
Effets d'un réseau de brise-vent (bocage).....	132
Conclusion.....	133
Exercices.....	134

3. Transferts de chaleur : température

Généralités.....	135
Température et chaleur.....	135
Rôle du bilan radiatif : effet de serre.....	137
Propagation de la chaleur : conduction.....	138
Notion de moyenne, d'amplitude, de normale.....	139
Mesure (repérage).....	140
Principales méthodes de détermination de la température.....	140
Mesures par contact.....	140
Mesures à distance.....	143
Indice actinothermique.....	144
Résultats.....	145
Variations en un même lieu dans le temps et l'espace.....	145
Variations d'un lieu à un autre : climat et microclimat.....	150
Évolution historique du climat.....	151
Température et plantes : importance agronomique.....	153
Action sur la croissance durant une phase de différenciation.....	154

Somme des températures (cas où la variation est linéaire)	155
Notion de Q_{10} : cas où la variation est exponentielle.....	157
Action sur la différenciation.....	157
Thermopériodisme	158
Accidents dus aux températures extrêmes et concernant les plantes....	158
Par le froid.....	159
Par le chaud (échaudage physiologique).....	166
Modifications du microclimat thermique	167
Brise-vent et bocage	167
Serre	168
Conclusion	169
Exercices.....	171

4. Transferts d'eau et d'énergie

Généralités.....	173
Propriétés et structure de l'eau : la liaison hydrogène	173
Eau à l'état statique : eau libre, eau liée, eau de constitution.....	177
Eau libre	177
Eau liée	182
Dynamique de l'eau	190
Résistance, conductance	190
Conductivité hydraulique.....	191
Stomates	192
Cycle de l'eau.....	193
Apports au niveau du sol	193
Pertes d'eau au niveau du sol : évaporation	197
Mesure.....	201
Teneur en eau, humidité	201
Mesure de l'humidité du sol.....	202
Mesure de l'humidité de l'air	202
Mesure de l'humidité des végétaux.....	204
Potentiel hydrique	204
Potentiel hydrique des végétaux.....	204
Potentiel hydrique du sol.....	205
Précipitations	206
Évaporation, évapotranspiration : bilan d'énergie.....	208
Mesure de l'évaporation et de l'évapotranspiration	208
Calcul de l'évapotranspiration.....	210
Résultats.....	211
Pluie	211
Tension de vapeur d'eau dans l'air.....	212
Potentiel	213
Évaporation, évapotranspiration	213
« Demande » climatique	213
Déficit théorique.....	214
Importance biologique et agronomique de l'eau.....	216
Contraintes dues à l'eau	216

Grêle	216
Excès d'eau	217
Persistance d'eau liquide sur la végétation	220
Insuffisance d'eau : aridité.....	221
Offre en eau du sol.....	222
Infiltration	223
Réserve en eau du sol (RU).....	224
Foisonnement du sol	228
Demande : évapotranspiration, advection	229
Eau dans la plante : point de vue dynamique.....	232
Estimation de l'équilibre offre-demande : flux de sève	233
Transpiration : réponse à la demande.....	234
Absorption.....	235
Plantes isohydriques et anisohydriques.....	238
Modifications possibles à l'échelle agronomique de l'équilibre offre-demande.....	239
Importance de la durée du jour sur la demande instantanée	243
Périodes sensibles, périodes critiques, coefficient cultural	244
Adaptation à la sécheresse : esquive, évitement, tolérance	246
Conclusion	247
Exercices.....	248

5. Transferts de gaz carbonique : métabolisme

Généralités.....	251
Propriétés : diffusion, thermodiffusion	252
Cycle du carbone	253
Gaz carbonique et climat : effet de serre de l'atmosphère	254
Métabolisme : respiration et photosynthèse	254
Sources et puits. Respirations de croissance et d'entretien	255
Mesure.....	260
Résultats.....	261
Bilan et évolution du gaz carbonique au niveau du globe	261
Variations de la teneur en gaz carbonique dans une culture	263
Importance agronomique	263
Photosynthèse : facteurs limitants	263
Photosynthèse et lumière.....	264
Photosynthèse et température.....	264
Photosynthèse et gaz carbonique	265
Photosynthèse et eau.....	267
Photosynthèse et azote.....	267
Photosynthèse et indice foliaire	268
Respiration.....	269
Rôle et comportement des stomates en fonction des facteurs du milieu	270
Ordre de grandeur des résistances	271
Régulation stomatique	271
Effets de la sécheresse	273

Efficienc.....	274
Efficienc de conversion de l'énergie solaire	274
Efficienc de l'eau : importance de la diversit.....	275
Production de biomasse, rendement, modélisation.....	285
Influence du gaz carbonique atmosphérique sur la température et les plantes.....	287
Effet sur la photosynthèse d'une augmentation de la concentration en gaz carbonique	288
Effet sur l'efficienc de l'eau.....	289
Conclusion	289
Exercices.....	290
Conclusion	
Quelques caractéristiques de la recherche en bioclimatologie	291
Agrométéorologie	292
Zonage agro-pédoclimatique	294
Réflexions sur l'aménagement du territoire et l'utilisation de l'espace	295
Fonctionnement des écosystèmes.....	295
Exemples de changements souhaitables	298
Villes nouvelles	298
Bocages	298
Écosystèmes et aménagement du territoire.....	299
Possibilités de recherches en bioclimatologie	300
Annexes	303
Références bibliographiques	307
Index	315

Avant-propos

Ce manuel prend ses sources dans un enseignement de la bioclimatologie dispensé à l'École nationale supérieure d'horticulture de Versailles et à l'Institut supérieur agricole de Beauvais.

Dans cet ouvrage, nous expliquons les processus fondamentaux, ce qui nécessite un rappel de bases élémentaires et définissons au mieux les termes propres à cette discipline : le *Dictionnaire encyclopédique d'agrométéorologie* réalisé en collaboration avec quelques spécialistes sera un complément utile dans ce domaine. En revanche, les techniques et matériels de mesure, déjà traités de façon exhaustive dans *Climatologie de l'environnement* (1997) de notre collègue Gérard Guyot, sont abordés ici de manière succincte.

Par souci de clarté et d'efficacité, nous avons limité le nombre de sujets traités aux plus intéressants. La trame principale de l'ouvrage repose sur les transferts d'énergie, bases de tous les processus vivants dans la biosphère : les transferts d'énergie par rayonnement ; l'aérodynamique et le vent qui jouent un grand rôle dans ce domaine ; les transferts de chaleur et la température ; les transferts d'énergie sous forme de chaleur latente et l'eau ; enfin les transferts de gaz carbonique liés au métabolisme et à la productivité végétale. À la fin de chaque chapitre, le lecteur trouvera des exercices dont certains avec les solutions.

Pour faciliter la lecture, des sujets d'importance secondaire ou d'ordre technique figurent en encadrés. Afin de ne pas alourdir le texte par des références bibliographiques, une liste d'ouvrages généraux et de références permettra à ceux qui le souhaitent d'approfondir leurs connaissances. Un index complète ce manuel destiné aux étudiants de l'enseignement supérieur.

Sané de Parcevaux

Remerciements

Nous remercions chaleureusement les collègues de l'Inra et de l'Ina-PG qui ont bien voulu relire ce texte et y apporter des corrections et de nombreuses améliorations : Raymond Bonhomme qui a revu le chapitre consacré au rayonnement, Yves Brunet celui sur le vent, Guy Richard le chapitre sur la température, Thierry Simonneau et Jean-François Castell celui sur l'eau et Olivier Bethenod celui sur le métabolisme. Nous remercions également Didier Picard et Bernard Seguin qui ont bien voulu revoir l'ensemble de l'ouvrage.

Les auteurs

Introduction

► Définition et place de la bioclimatologie

La bioclimatologie est une branche de l'écologie, qui peut se définir comme étant la science de l'étude des relations entre les êtres vivants et le milieu ambiant.

Selon les êtres vivants considérés, l'écologie peut être végétale, animale ou humaine. Le milieu ambiant se caractérise par des facteurs physiques, chimiques et biologiques. Les premiers sont pratiquement liés à des phénomènes énergétiques de nature climatique ; ces facteurs comprennent le rayonnement, la température, le vent et dans une certaine mesure l'eau qui intervient aussi sous l'angle chimique. Les facteurs chimiques, outre l'eau, le gaz carbonique et l'oxygène, sont constitués des éléments minéraux nécessaires à la vie, tels qu'ils sont définis, notamment en agronomie, sous les termes d'engrais (N,P,K) et d'oligo-éléments. Les facteurs biologiques recouvrent notamment les phénomènes de compétition, d'association, de symbiose, de commensalisme, de parasitisme animal ou végétal ou ceux dus à l'action de l'homme.

La bioclimatologie, branche de l'écologie, a pour objet l'étude des facteurs de nature climatique dans leurs relations avec les êtres vivants. En France historiquement, la bioclimatologie humaine est étudiée par les médecins, la bioclimatologie végétale, en revanche, l'est essentiellement dans le cadre de la recherche agronomique depuis de nombreuses années et la bioclimatologie animale en est à ses débuts.

Cette discipline fait appel à de nombreuses connaissances issues d'autres domaines scientifiques, comme l'énergétique, la thermodynamique, la physiologie, la génétique,... Elle est au carrefour de la physique et de la biologie et son domaine d'activité se situe dans la biosphère continentale et particulièrement au niveau de l'interface sol-air : c'est une discipline de synthèse par excellence.

La bioclimatologie vise à étudier les conditions d'adaptation du climat à la plante et inversement. Pour cela, elle dispose de divers moyens d'action sur les plantes : l'utilisation de variétés génétiques aux exigences variées, la possibilité pour les espèces annuelles sensibles au gel (haricot, tomate, pomme de terre, maïs,...) de jouer sur les dates de semis... Les moyens d'action sur les facteurs du milieu sont encore plus importants, que ce soit grâce aux abris et aux serres, que ce soit grâce à l'irrigation ou aux méthodes de lutte contre les accidents climatiques et notamment le gel.

►► **Domaine et particularités de la bioclimatologie**

La bioclimatologie est concernée par des processus de plusieurs niveaux : depuis le bassin versant de plusieurs dizaines de kilomètres carrés jusqu'à la cellule (par exemple le stomate) en passant par l'échelle agricole, quelques centaines d'hectares, qui correspond d'ailleurs à l'échelle de l'abri météorologique classique représentatif du mésoclimat, par l'échelle de la culture à laquelle correspond le microclimat et par l'échelle de la plante ou de la feuille à laquelle correspond le microclimat ponctuel. Les appareils utilisés sur le terrain effectuent presque toujours des mesures ponctuelles, correspondant donc à la dernière échelle définie. Un certain nombre d'hypothèses et de considérations techniques et pratiques permettent une extension des résultats aux autres échelles.

L'énergie disponible au niveau de la biosphère et dont la source essentielle est le soleil se trouve à l'origine de toutes les variations des facteurs climatiques. Il en résulte une interdépendance plus ou moins étroite entre tous ces facteurs. C'est ainsi que l'énergie solaire, qui nous parvient sous forme radiative, est en grande partie absorbée au niveau du sol et dégradée sous forme de chaleur ; cette chaleur est à l'origine d'une élévation de la température des surfaces d'interception. L'air s'échauffe au contact de ces surfaces, sa densité diminue et il s'élève, donnant ainsi naissance au vent. En prenant de l'altitude, l'air se refroidit et la vapeur d'eau qu'il contient se condense partiellement en formant des nuages qui peuvent se résoudre en pluie, restituant au sol l'eau précédemment évaporée sous l'influence d'une partie du rayonnement solaire absorbé. Ces transferts d'énergie et ces déplacements sont indispensables au fonctionnement normal des êtres vivants. Les phénomènes vitaux sont d'autant plus actifs que les gradients énergétiques sont élevés.

En fait, pour bien comprendre tous ces phénomènes, il est nécessaire de faire l'étude du bilan d'énergie au niveau des êtres vivants. Le bilan énergétique d'une surface est la somme des flux énergétiques de toute nature dont elle est le siège. On convient généralement de considérer les flux entrants comme positifs et les flux sortants comme négatifs. Quatre sortes de flux énergétiques sont en cause ; il faut y ajouter un terme rendant compte des fluctuations temporelles du stock d'énergie :

$$\text{flux radiatif} + \text{flux thermique} + \text{flux hydrique} + \\ \text{flux métabolique} + \text{fluctuations} = 0$$

À part le flux d'origine métabolique, tous les autres termes sont de nature strictement physique. Ce flux n'existe bien entendu que dans le cas d'organismes biologiquement actifs et, sauf cas particulier, notamment chez les animaux, il est généralement faible et peut être négligé dans une première approximation. Les termes de ce bilan vont être passés en revue dans les différents chapitres de cet ouvrage.

Nous voudrions maintenant exposer quelques considérations générales susceptibles d'éclairer le lecteur sur certaines démarches scientifiques mises en œuvre par le chercheur dans cette discipline : organisation de l'espace, étude des systèmes, méthodologie de recherche.

► Constitution et organisation de l'espace

Selon les théories actuelles, à l'origine de l'univers accessible à notre connaissance, il y eut une explosion initiale ou « big-bang ». Depuis l'univers se dilate et se refroidit. Dans les premières phases de cette expansion, la matière s'est peu à peu individualisée au détriment de l'énergie selon la relation d'équivalence d'Einstein ($E = mc^2$). Autrement dit, l'univers, tel que nous le connaissons aujourd'hui, et les lois qui le régissent, préexistaient dans la création de cette énergie initiale.

Homogénéité et hétérogénéité de l'espace

Cette origine énergétique unique confère à la fois une certaine unité et une certaine logique dues à l'interdépendance des phénomènes qui en découlent, mais aussi une certaine hétérogénéité due aux conditions locales conduisant à une transformation plus ou moins grande d'énergie en matière. Cette hétérogénéité spatiale est maintenue notamment par l'expansion continue de l'univers et par les forces de gravitation. Les densités de matière et d'énergie qui en résultent sont variables dans l'espace et dans le temps. Il y a donc des gradients de substance et d'énergie. Selon la tendance naturelle à l'homogénéisation découlant notamment du deuxième principe de la thermodynamique, ces gradients sont à l'origine de circulation ou de flux de matière et d'énergie. Ces flux sont plus ou moins ralentis par les forces de frottement ; ils dépendent de la distance à parcourir, mais aussi de la perméabilité ou de la conductance, en un mot, des facilités de déplacement. À cette tendance à l'homogénéisation que l'on explicite en thermodynamique en disant que l'entropie d'un système isolé, par exemple l'ensemble de l'univers, ne peut qu'augmenter, s'oppose une certaine organisation spatiale due par exemple aux forces d'attraction qui maintiennent plus ou moins temporairement une certaine structuration locale de l'espace. Dans certains cas, l'entropie peut même diminuer localement bien qu'elle continue à croître globalement pour l'ensemble ; ce phénomène local exige un apport d'énergie externe et une consommation ou dégradation interne importante. Prigogine appelle de tels phénomènes, des « structures dissipatives » : elles sont dissipatives en ce sens qu'elles ne peuvent exister ou se maintenir qu'au prix d'une consommation importante d'énergie. Cette propriété particulière n'existe qu'assez rarement dans certains systèmes physiques ou chimiques, mais elle est caractéristique des systèmes vivants.

Organisation spatio-temporelle

La densité volumique et la nature de la matière, la répartition et la circulation de l'énergie sont autant de critères qui permettent de reconnaître l'architecture et l'organisation de l'espace. L'univers est constitué sur un mode hiérarchique depuis les superamas de galaxies jusqu'aux plus petites particules actuellement connues de matière (quark, électron, neutrino) et d'énergie (photon). L'ensemble est structuré en systèmes emboîtés les uns dans les autres à la manière de poupées gigognes. Ces systèmes sont plus ou moins complexes et plus ou moins organisés. Il est logique

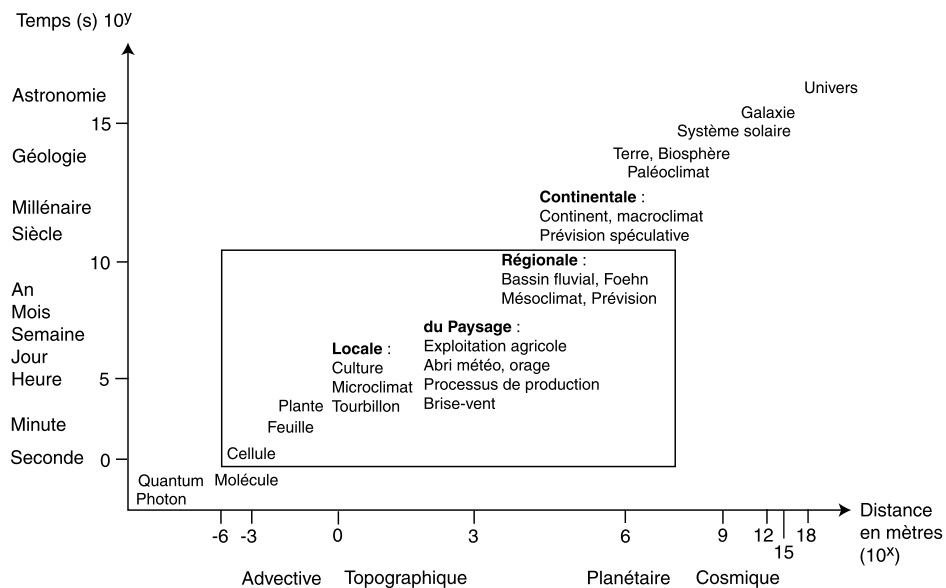


Figure 1. Échelles spatio-temporelles.

de les présenter selon une échelle spatiale, mais si l'on s'intéresse à l'évolution et au fonctionnement de ces systèmes, il faut aussi y associer une échelle temporelle (fig. 1). Pour mieux préciser le domaine spatio-temporel (encadré dans la figure ci-dessus) qui nous intéresse, il a été replacé dans une vue schématique de l'ensemble des systèmes. Les éléments en gras correspondent aux échelles que nous étudierons plus en détail dans le chapitre 2.

Il y a évidemment une étroite liaison entre les échelles d'espace et de temps. Si, à l'échelle d'une région, l'étude de fluctuations d'une périodicité de l'ordre de quelques minutes est complètement absurde, il n'en est pas de même à l'échelle de la feuille ou même d'une culture.

Les relations entre systèmes peuvent se concevoir de deux manières, verticale ou horizontale. L'étude de l'emboîtement des systèmes de niveaux différents correspond à la prise en compte des relations verticales ; quelles sont les différences qui apparaissent en gravissant les niveaux de la feuille à la plante, puis à la culture et à l'exploitation agricole ? Il est évident que le fonctionnement d'un système de niveau supérieur ne résulte pas seulement de la somme des fonctionnements des systèmes composants de niveau inférieur. Nous y reviendrons plus loin. Les relations entre systèmes d'un même niveau, entre plantes, entre cultures sont de type horizontal. Il n'est pas simple de définir de façon précise les limites d'un système : où et quand est-on à l'intérieur ou à l'extérieur d'un système donné ? Comment définir et repérer la limite ou l'interface entre deux systèmes ? Le plus simple est de définir ces limites comme étant les lieux de l'espace où il existe une variation rapide de densité de matière d'une certaine nature, c'est-à-dire un gradient de densité ou une modification de l'hétérogénéité spatiale plus grande qu'à l'intérieur du système. En

fait l'existence de ces gradients va induire des circulations, des flux de matière et d'énergie au niveau de ces interfaces entre systèmes qui seront freinés par des forces de frottement ou de cohésion.

Quantité et qualité : énergie et information

En réalité une grande part des transferts d'énergie se fait pratiquement indépendamment de la matière par l'intermédiaire des photons ; cette circulation se fait à grande vitesse, vitesse de la lumière, et éventuellement à grande distance. Les vitesses de transfert de la matière sont beaucoup plus faibles et dépendent des conditions locales ; cette circulation ne concerne que les faibles distances. Généralement l'influence de ces transferts est proportionnelle à leur intensité. Mais il y a des processus, notamment dans le domaine biologique, où il suffit de quelques photons de qualité particulière (photopériodisme) ou de quelques molécules (phéromones, hormones...), pour modifier considérablement le fonctionnement d'un système. Pour différencier ces facteurs qualitatifs – mettant en jeu d'infimes quantités de matière ou d'énergie, des phénomènes quantitatifs – nous les appellerons informations. Une information sera donc un facteur de type qualitatif qui ne met en jeu qu'une quantité infime d'énergie ou de matière : elle peut modifier considérablement le fonctionnement d'un système ou renseigner sur son état ou sa position. L'état d'un feu tricolore renseigne l'automobiliste, lui transmet une information ; les conséquences qui s'en suivent ont une importance énergétique ou matérielle sans commune mesure avec l'énergie des quelques photons colorés qui ont atteint la rétine du conducteur.

Systèmes et interfaces

À un niveau donné d'intégration, l'espace peut donc se résoudre en un certain nombre de systèmes, comportant ou non de la matière vivante, qui interagissent entre eux à travers des interfaces. Pour un système déterminé, tout ce qui l'entoure constitue le milieu environnant. Cet environnement n'est pas indifférent à sa présence ; il est modifié ou perturbé dans une zone d'influence que l'on peut appeler couche limite associée au système. L'interface ou limite entre systèmes n'est pas une surface sans épaisseur : elle a un certain volume qui dépend du niveau d'intégration et des phénomènes pris en compte. Comme il est beaucoup plus facile d'étudier un système spatialement homogène et temporellement relativement stable, les efforts de recherches notamment en biologie ont presque exclusivement porté jusqu'à présent sur la structure et le fonctionnement interne des systèmes étudiés aussi loin que possible des zones hétérogènes et instables. Une grande part des difficultés en prévision météorologique tient à ce type de phénomènes. Les recherches sur le comportement des cultures éliminent presque toujours explicitement les effets de bord. Le médecin, surtout le spécialiste, soigne davantage la maladie que le patient et ne tient qu'exceptionnellement compte de l'environnement matériel, moral et affectif du malade. Une grande part des incompréhensions humaines vient d'une insuffisante prise en compte des zones marginales, de transition ; ceci est vrai à tous les niveaux de la connaissance. Il convient donc de faire un effort conséquent de recherche concernant ces domaines hétérogènes et relativement instables que sont les interfaces entre systèmes.

► Structure, évolution et fonctionnement des systèmes

L'étude de la structure, statique, et de l'évolution, dynamique, des systèmes fait l'objet de l'ensemble des disciplines scientifiques, de l'astronomie à la physique particulière. L'étude du fonctionnement s'y ajoute pour tous ceux qui, de niveau d'intégration intermédiaire, comprennent plus ou moins explicitement des systèmes vivants (fig. 1). Le système biologique du niveau le plus intégré est la biosphère. C'est une pellicule relativement très mince qui recouvre la surface du globe terrestre et qui contient la quasi-totalité des êtres vivants. Elle est mince car la densité de matière vivante ou de biomasse est maximale à l'interface du sol et de l'air : au voisinage du sol, la densité volumique de la végétation peut atteindre 1 à 2 %, soit 10 à 20 litres par mètre cube. Cette densité décroît très vite dans le sol ; au-delà d'un à deux mètres de profondeur, sauf exception (grotte, système souterrain...), on ne trouve pratiquement plus de matière vivante. De même, au-dessus du sol et dans les océans et les lacs, au-delà de quelques dizaines de mètres, cette densité devient négligeable. Les systèmes vivants, systèmes ouverts et structures dissipatives, doivent disposer d'énergie, et donc pour cela être dans une zone où les gradients d'énergie sont importants ; or il se trouve que l'interface air-sol présente justement ces caractéristiques ; en effet la quasi-totalité des photons provenant du soleil sont absorbés à la surface du sol. L'énergie qu'ils transportent est transformée essentiellement en chaleur, mais aussi par la photosynthèse, créant ainsi d'importants gradients d'énergie favorables au bon fonctionnement de tels systèmes.

L'étude de la structure, du fonctionnement et de l'évolution des systèmes vivants depuis le niveau de l'individu jusqu'à celui de la biosphère fait l'objet de l'écologie. **L'écologie est en effet la science qui étudie les interactions entre les êtres vivants et le milieu ambiant.** Ce milieu comprend des systèmes inertes, mais aussi d'autres systèmes vivants, éventuellement de la même espèce. Dans ce dernier cas, les chercheurs font de la biologie des populations. **De manière générale, les écologues sont des chercheurs qui se consacrent à l'étude scientifique de l'écologie, en refusant de cautionner certaines prises de position des écologistes politiques.** Certes le développement de la science écologique peut et doit contribuer à un aménagement rationnel et équilibré des ressources terrestres en fonction des besoins actuels et futurs de l'humanité dans une optique plus positive que négative. La meilleure écologie appliquée est certainement celle de l'agriculture dite du « bon père de famille », qui pense à ses enfants.

Tous les systèmes organisés évoluent : ils naissent, vivent et meurent. L'homme peut modifier considérablement l'évolution des écosystèmes de la biosphère. Il peut retarder ou accélérer le processus d'évolution normale ; il dispose d'un pouvoir créateur, mais aussi destructeur. Il convient de distinguer dans ces processus d'une part ce qui constitue la croissance ou l'augmentation de la biomasse et conditionne donc la productivité et d'autre part ce qui constitue la maintenance ou le maintien d'une structure organisée dans un état d'équilibre dynamique. Un système jeune se caractérise par une croissance active, un système adulte ou mûr par un certain état d'équilibre, une certaine stabilité. Il y a un autre phénomène assez général qui caractérise l'« âge » d'un écosystème, c'est sa diversité. Dans un système jeune,