

Études sur l'environnement

De l'échelle du territoire
à celle du continent

15



rappports sur la science et la technologie

Editions
TEC
& **DOC**

Territoire de l'écologie et écologie des territoires

Robert Barbault, Alain Pavé

1 ■ L'écologie en France : quelques repères

1.1. Quelques mots d'histoire

1.1.1. L'homme et son milieu : l'émergence des questions

Les problèmes soulevés par les relations de l'homme avec son milieu, notamment avec les autres êtres vivants qui peuplent la planète, sont aussi anciens que l'humanité elle-même. L'homme n'est pas une espèce autotrophe, sa subsistance et son développement dépendent d'abord des ressources alimentaires qu'il pourra trouver ou produire. L'essentiel de ces ressources provient d'autres êtres vivants ; elles sont renouvelables. Elles lui procurent aussi d'autres biens, par exemple des matériaux ou des médicaments. Pour lui-même et pour assurer le renouvellement des ressources vivantes, il doit ménager les sols ; il a besoin d'eau, ressource elle aussi renouvelable dont la gestion quantitative et qualitative a été l'une des premières préoccupations de l'humanité dès la naissance de l'agriculture. C'est d'ailleurs à ce sujet que les premiers aménagements ont été conçus, par exemple avec l'apparition des parcelles cultivées et de l'irrigation en Mésopotamie. Gestion de l'eau, gestion des ressources vivantes sont donc des problèmes anciens. On ne peut nier qu'ils ont trouvé des solutions, au moins locales, certes longtemps empiriques, mais qui ont quand même permis le développement des sociétés humaines.

Mais les relations de l'homme avec son milieu ne sont pas réduites à la production de biens de subsistance. Ce milieu lui fournit aussi ce qu'on appelle aujourd'hui des services, tout aussi nécessaires. C'est le cas, par exemple, des fonctions d'élimination de déchets engendrés par l'activité humaine, par exemple par les hydrosystèmes, ou les aménités diverses qu'il offre, on peut penser notamment aux aspects récréatifs. Enfin, ce milieu n'est pas que source de confort, il recèle aussi des dangers, par exemple des agents agressifs ou source de maladies (animaux dangereux, plantes et produits toxiques ou allergènes, micro-organismes pathogènes). Il s'agit aussi de bien évaluer ces dangers et de les surmonter. Pendant longtemps, les risques correspondants, supposés ou avérés, ont contribué à donner une image négative de la nature. L'homme se battait contre cette nature, ou du moins le croyait-il. Il s'agissait donc de la domestiquer, de l'arranger, de l'aménager, voire quelquefois même de la supprimer.

Tout cela bien pesé, le développement des sociétés humaines s'est échelonné sur près de 10 000 ans. Cette échelle de temps, sans doute négligeable à l'échelle géologique mais non à celle de ces sociétés, permet quand même de parler de **développement durable**.

Ce qui pose problème aujourd'hui, c'est l'ampleur des événements et leur accélération : croissance démographique, développement tech-

nique et économique. Des déchets nouveaux ne sont plus éliminés par le milieu naturel. L'impact des activités humaines est perceptible du niveau local au niveau planétaire. Même si on peinait à en prouver scientifiquement la réalité, la question s'est posée très tôt. Ainsi, dès le XVIII^e siècle, on commence à s'interroger sur l'exploitation des ressources halieutiques et en 1824 Joseph Fourier s'interroge sur les effets, qu'on qualifie maintenant de globaux, du développement technique et économique. Depuis, ces problèmes n'ont fait que s'amplifier. C'est pour ces raisons, que la question, qui ne s'était jamais clairement exprimée, du développement à long terme se pose aujourd'hui.

Progressivement, on découvrait aussi les multiples interdépendances entre l'homme et son milieu, entre l'homme et les autres êtres vivants, entre les différentes composantes biologiques et non biologiques de ce milieu, entre les productions de l'homme, notamment techniques ou issues de ces techniques, et ces composantes. Il n'est pas non plus indifférent de noter que des risques nouveaux sont apparus : invasions biologiques, déstockage d'agents pathogènes, en particulier de virus, dégradation des milieux favorisant la multiplication des risques sanitaires.

C'est de ce dernier constat qu'est née l'écologie à la fin du XIX^e siècle : on ne peut plus analyser séparément les différentes composantes de la nature ; il faut intégrer les relations qu'elles entretiennent entre elles, notamment les interactions entre les entités vivantes, de l'organisme aux écosystèmes, et les relations de ces entités avec les composantes géophysicochimiques du milieu. Peu à peu s'est construite une image systémique de la nature qui s'est traduite dans le langage par l'introduction et l'emploi de termes comme « systèmes écologiques » ou « écosystèmes ».

Néanmoins, l'essor de cette discipline au cours de la deuxième moitié du XX^e siècle s'est accompli au détriment de la prise en compte des dimensions humaines qui contribuèrent pourtant à son émergence (Deléage, 1991 ; Barbault, 1996). Tant les effets directs et indirects des actions de l'homme sur les systèmes écologiques que, inversement, les conséquences pour l'homme et ses sociétés du fonctionnement, ou des dysfonctionnements, de ces systèmes ont été placés hors du champ même de l'écologie : il suffit de se pencher sur les manuels qui sont parus en grand nombre depuis les années 60 pour s'en convaincre. Depuis cette époque et jusqu'à aujourd'hui où s'amorce un revirement (Lubchenco *et al.*, 1991 et Lubchenco, 1998, par exemple) il était de bon ton de ne s'intéresser qu'à des systèmes « non perturbés ».

Dans le même ordre d'idée, l'écologie, fille de l'histoire naturelle, a été peu traduite en termes techniques. Même si des ingénieurs agissaient et discouraient sur des systèmes écologiques et si des scientifiques étudiaient la structure et le fonctionnement de ces systèmes, les

liens entre les communautés étaient ténus et, il n'y a pas si longtemps encore, quelquefois conflictuels.

1.1.2. Éléments d'une épistémologie de l'écologie

L'écologie, science de l'homme et de la nature, affiche Jean-Paul Deléage dans le titre de son *Histoire de l'écologie* (1991).

À lire les manuels d'écologie, à parcourir les grandes revues de la discipline, on est porté à s'interroger sur la pertinence de cette affirmation : l'écologie apparaît bel et bien comme une science de la nature (encadré 1). Cependant, en seconde analyse, en prenant du recul vis-à-vis de l'écologie scientifique du xx^e siècle, en acceptant de se pencher sur l'histoire de cette discipline, on est conduit à donner raison à Jean-Paul Deléage : la vocation de l'écologie, par ses origines et ses objectifs ultimes, en fait bien une science de l'homme et de la nature – une science du xxi^e siècle. On essaiera de tirer les conséquences de cette affirmation au chapitre 7, « Analyse économique et sociale ».

De fait, depuis son émergence à la fin du xix^e siècle, marquée par les inquiétudes suscitées par la révolution industrielle, l'écologie s'est quelque peu détournée de ses préoccupations initiales pour s'ériger en science rigoureuse, expérimentale – mais exclusivement dans le champ des sciences de la nature. Ainsi, la deuxième moitié du xx^e siècle fut-elle marquée par l'essor de l'écologie des populations et des peuplements, une écologie très ancrée dans les sciences du vivant, étroitement liée à la génétique et à l'éthologie et fortement nourrie par un néodarwinisme des plus féconds. Parallèlement émergeait une écologie écosystémique, qui peinait toutefois à donner sa pleine mesure, peut-être parce que trop dépendante d'une pluridisciplinarité difficile à imposer et coupée d'une agronomie volant depuis longtemps de ses propres ailes.

Mais cette écologie-là, populationnelle et écosystémique, fière à juste titre de ses développements théoriques et expérimentaux, est loin de faire le tour de la question. Trop de distance a été prise avec une réalité planétaire où homme et nature ne sont pas impunément dissociables ou opposables. Les critiques se développent depuis les années 80, où, d'une part, l'on parle de plus en plus d'écologie du paysage, de macroécologie, d'écologie globale – c'est-à-dire planétaire – (Brown, 1995, 1999; di Castri, 2000) tandis que s'arme d'autre part une biologie de la conservation qui renoue avec les questionnements de type social et économique et s'érige ouvertement en science d'action (Barbault, 1997; Czech, 2000; Mangel *et al.*, 1996).

Et c'est là le véritable problème que n'a pu encore surmonter l'écologie scientifique, d'abord faute de le poser. Elle se veut science pure et objective. Le champ des applications, occupé déjà par les sciences

forestières et agronomiques d'une part et par les mouvements ou partis « verts » d'autre part, apparaît dangereux aux chercheurs. Et, de fait, le terrain est glissant : les écologues sont attendus au tournant ! Quant à l'aménagement du territoire, elle ne s'en est jamais vraiment préoccupée.

Il n'en reste pas moins que tant le développement conceptuel de l'écologie que la nécessité croissante d'une justification sociale de l'exercice scientifique lui imposent un retour aux préoccupations environnementales qui marquèrent en partie ses origines (Barbault, 1996; Deléage, 1991; Lubchenco *et al.*, 1991; Lubchenco, 1998; di Castri, 2000). Voilà pourquoi l'analyse épistémologique de Jean-Paul Deléage (1991) est particulièrement pertinente.

Il est opportun de rappeler que dès ses premiers développements significatifs à la fin du xix^e siècle et au début du xx^e siècle perçait une préoccupation de type social ou économique à l'origine des recherches entreprises et des élaborations conceptuelles. Si Pearl, Lokta, Volterra se sont penchés sur les lois de croissance des populations animales et la modélisation de leurs interactions c'est, en partie au moins, dans le contexte de réflexions démographiques et économiques marquées par *L'essai sur le principe de population* de Thomas Malthus (1798) et par sa critique par Verhulst qui conçut le célèbre modèle logistique (Verhulst, 1844, 1846), puis par des sollicitations de la société (voir la remarquable analyse de Sharon Kingsland, 1985). Ainsi, la modélisation des systèmes prédateurs-proies de Volterra est née d'interrogations relatives à l'effondrement des pêcheries sur les côtes adriatiques. La formalisation du concept de biocénose par Möbius (1877) émergea à la faveur d'une étude sur les bancs de moules de mer du Nord, menacés par une surconsommation consécutive au développement des transports et des échanges commerciaux en Europe. Et que dire des intérêts de Thompson (1922) pour la dynamique des populations, stimulés par le succès des insectes ravageurs des cultures !

Encadré 1

Structure épistémologique de l'écologie

Comme toute science, l'écologie doit être caractérisée par les techniques et méthodes qu'elle emploie et *par les grands types de mécanismes ou de phénomènes auxquels elle donne accès* (fig. 1.1.). En simplifiant on peut dire que, au-delà du polymorphisme qui fait sa richesse et de sa large ouverture sur d'autres disciplines, l'écologie moderne se structure autour de deux axes fondamentaux qui s'incarnent l'un dans l'étude de la dynamique et du fonctionnement des populations et des peuplements et l'autre dans celle de la dynamique

et du fonctionnement des écosystèmes et des paysages-champs qui se chevauchent d'ailleurs largement.

Dans le cadre du premier champ, celui de l'écologie populationnelle, on s'intéresse à des objets qui sont des populations – animales, végétales ou microbiennes – à leur dynamique et à leurs interactions. Taux de mortalité, taux de fécondité, effectifs par unité de surface ou de volume, régulation dépendante de la densité, structure sociale, structure génétique, traits physiologiques, comportements, relations de compétition ou de prédation, mutualisme – voilà autant de processus ou d'interactions biodémographiques dont l'analyse demande une solide formation spécialisée. Notons au passage que le concept de population, apparemment banal pour l'espèce sociale que nous sommes, nous oblige à un saut épistémologique que les naturalistes n'ont accompli que très tardivement – quand ils l'ont fait !

Dans le second champ majeur représenté à droite dans le schéma de la figure 1.1., celui de l'écologie écosystémique, les objets de recherche, écosystèmes et paysages, ne sont plus exclusivement biologiques. On s'intéresse aux cycles de la matière et aux flux d'énergie qui les structurent : processus et mécanismes de décomposition, de production, de transferts, de recyclage – on parle de cycles *biogéochimiques* car leur moteur est biologique, constitué par les populations évoquées précédemment. C'est bien souligner que nous avons là deux axes de structuration de l'écologie, deux champs de force, mais certainement pas deux écologies étrangères l'une à l'autre.

Enfin, il suffit de lire le magistral essai de Vernadsky, *La Biosphère*, paru en russe en 1926 et en français en 1929 (voir la récente réédition préfacée par Jean-Paul Deléage, 1997 et l'article de Florian Charvolin, 1994), pour se convaincre de la maturité des pères fondateurs, scientifiques engagés dans les bouleversements de leur monde.

Il est temps de revenir aux sources.

Équilibre et gestion des écosystèmes et de leurs ressources, restauration des milieux et des peuplements naturels ou exploités, conditions écologiques d'un développement durable, contrôle des pollutions et des populations de ravageurs, voire des invasions biologiques, aménagement écologique du territoire, impacts des gaz à effets de serre, conséquences des changements climatiques, etc., voilà un contexte qui impose de nouvelles réflexions et de nouvelles orientations à une écologie que d'aucuns voient s'essouffler dans un académisme déplacé.

Il faut bien dire que les développements récents de l'économie écologique ou de l'écologie industrielle n'ont pas pénétré encore les manuels d'écologie – où l'écologie globale n'est d'ailleurs évoquée, le

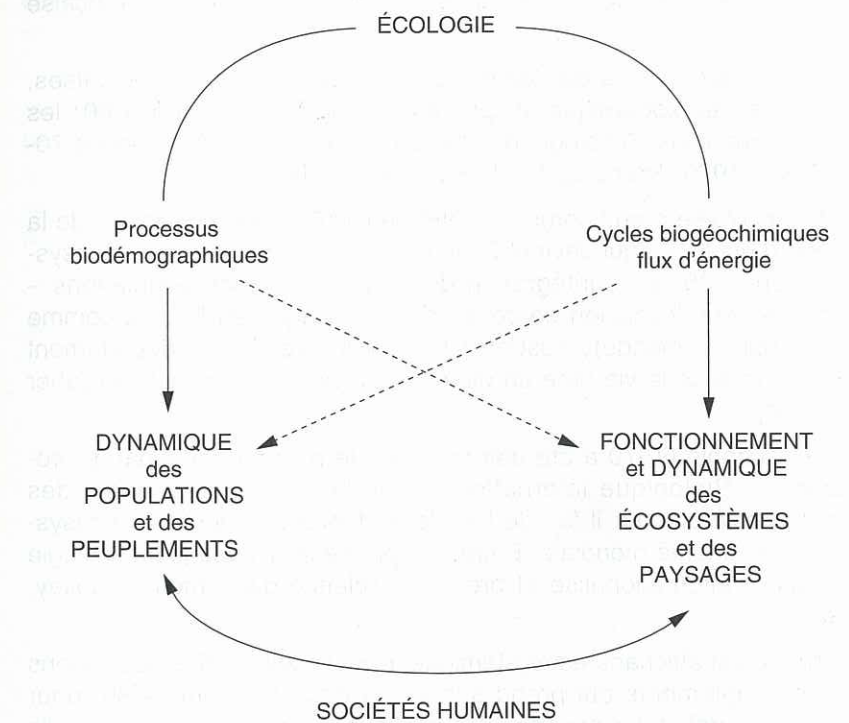


Figure 1.1. L'écologie, en tant que science de la nature, a pour objet, d'une part l'analyse des processus biodémographiques qui interviennent dans la dynamique des populations et des peuplements et, d'autre part, l'étude des cycles biogéochimiques et des flux d'énergie qui animent écosystèmes et paysages. Parce que les sociétés humaines dépendent de ces cycles et processus, et les affectent, que l'écologie est appelée à communiquer de plus en plus avec les sciences de l'homme et de la société.

plus souvent, que très marginalement (Begon *et al.*, 1996 – pour citer un manuel largement utilisé, et par ailleurs très bien documenté).

1.2. Les obstacles au développement de l'écologie en France

En France, l'écologie a connu un développement tardif. Quelques dates suffisent à en donner une image saisissante, mieux qu'une longue analyse.

1. Tandis que la British Ecological Society d'une part et l'Ecological Society of America d'autre part remontent, respectivement, à 1913

et 1915, il faut attendre 1969 pour voir se constituer la Société française d'écologie.

2. L'enseignement de l'écologie dans les universités françaises, longtemps très sporadique, n'apparaît qu'à la fin des années 60; les premiers manuels d'écologie d'auteurs français datent des années 70-80 (Dajoz, 1970; Ramade, 1974; Barbault, 1981).

3. L'écologie prend corps au CNRS en 1976, avec la création de la section d'Écologie (qui devient Biologie des populations et des écosystèmes en 1985, avec intégration de la génétique des populations – étape-clé pour l'évolution de ce champ scientifique en France comme ailleurs dans le monde); c'est en 1986 que la direction du département des sciences de la vie crée un directeur-adjoint de la discipline (Zaher Massoud).

La décennie 60-70 a été marquée, sur le plan mondial, par le programme « Biologique international » de l'Union internationale des sciences biologiques: il fait de l'étude du fonctionnement des écosystèmes une priorité mondiale. Entraînée par cette dynamique, l'écologie française s'internationalise et prend conscience d'elle-même (Golley, 1993).

Malgré cet affichage écosystémique, c'est l'écologie des populations et des peuplements qui prend son envol dans les années 80, pour atteindre au début des années 90 le meilleur niveau international, tandis que l'écologie des écosystèmes reste encore en retrait.

► Pourquoi ce différentiel, apparemment paradoxal ?

On peut identifier deux obstacles à un véritable déploiement de l'écologie écosystémique en France, à l'origine d'un sous-développement structurel encore préjudiciable à l'essor de cette discipline aujourd'hui.

Le premier réside dans le cloisonnement disciplinaire et institutionnel du dispositif français d'enseignement et de recherche. Gérée au CNRS dans le cadre du département des sciences de la vie et dans les UFR de biologie au sein des universités, l'écologie a bénéficié des révolutions théoriques et techniques de la biologie – d'où le développement spectaculaire de l'écologie évolutive et des recherches sur l'écologie des populations et des peuplements (y compris celui de l'écologie microbienne et de l'écologie parasitaire). Elle est restée à l'écart en revanche des percées méthodologiques accomplies par les sciences de l'Univers, évidemment nécessaires pour le déploiement opérationnel des recherches sur les écosystèmes, de la parcelle à la biosphère tout entière en passant par des ensembles de dimension régionale. Il faut noter au passage, comme on le verra au chapitre 4, « Gestion des zones côtières », que l'écologie marine, prise en charge en tant qu'océanographie par l'Institut des sciences de l'Univers, a profité de

cette dynamique pour son volet « cycles biogéochimiques » – à la différence de l'écologie terrestre¹.

Le second obstacle, qui explique l'inexistence de l'ingénierie des systèmes écologiques dans notre pays (hors agrosystèmes), tient d'une part à l'opposition de cultures entre universités et écoles d'ingénieurs (et aussi entre organismes de recherche fondamentale et organismes de recherche finalisée), d'autre part, au peu de crédit accordé à l'écologie par la communauté scientifique dominante (sans parler de la confusion, réelle ou supposée, avec le militantisme vert). Est-il étonnant, dans ces conditions, que le mot écologie, donc la chose, soit resté, jusqu'à ces dernières années où une vraie mutation se dessine, très peu utilisé dans les « circuits officiels » de l'Inra, du Cirad ou du Cemagref ?

Ajoutons pour finir que la vie autonome de l'agronomie n'a pas aidé à combler ce fossé entre écologie théorique et académique d'une part et écologie appliquée d'autre part.

1.3. État actuel de la discipline

La façon la plus robuste de caractériser le potentiel réel d'une discipline scientifique est sans doute de recenser les laboratoires qui s'y consacrent.

La principale difficulté de l'exercice réside dans la définition précise du périmètre concerné. On adoptera ici le cadrage que constituent les commissions nationales d'évaluation, à savoir la commission 67 du CNU (biologie des populations et des écosystèmes) et principalement la section 30 du Comité national de la recherche scientifique (avec un regard sur la section 12 pour les laboratoires marins).

L'inventaire ainsi obtenu figure dans l'annexe 1.

Parmi les unités de recherche rattachées, à titre de commission principale ou secondaire, à la section 30 du Comité national de la recherche du CNRS, 23 affichent une orientation ou une composante « écosystème »: 15 concernent des milieux continentaux (5 ont une spécialisation hydrosystème), 8 le milieu marin côtier (annexe 1).

Affichent ou affichaient ? Fait significatif en effet, nombre d'unités originellement clairement orientées vers l'étude des écosystèmes², dans l'impulsion créée par le Programme biologique international, ont vu

1. Il est vrai que ce clivage entre écologie terrestre et écologie marine n'est pas un phénomène strictement français: il apparaît aussi au niveau des grands journaux internationaux.

2. UMR Amoros (ex Angelier), UMR Clobert (ex Lamotte), UPR Delay (ex Godron), UMR Gouyon (ex Lemée) notamment.

stagner ou régresser leurs composantes écosystèmes tandis que se développaient au contraire, à partir des années 80, les orientations populationnelles et génétiques. Significative pour les laboratoires dépendant des sciences de la vie, à vocation continentale, cette évolution n'affecta pas sensiblement les laboratoires marins, rattachés principalement au département des sciences de l'Univers.

Quoi qu'il en soit, on recense aujourd'hui dans ces 23 laboratoires un potentiel de 1 160 statutaires. La proportion réellement engagée dans des problématiques écosystèmes ne dépasse pas 40 %.

Les 20 autres unités recensées ont des ciblage « organismes » ou « populations », huit d'entre eux à dominante et origine génétique – même si les problématiques génétiques et évolutives tendent à se développer parmi les autres (comme dans le premier lot traité).

Ils représentent un potentiel de 608 statutaires. En d'autres termes, compte tenu des compétences qui se sont développées dans le premier ensemble de laboratoires, on peut estimer à 1 200 les personnels à formation écologique (*lato sensu*: zoologie, botanique, etc.) ou génétique, voire physiologique ou microbiologique, mobilisés sur des questions naturalistes touchant à des organismes ou des populations.

Si cette communauté scientifique apparaît très éloignée des problèmes d'ingénierie des territoires, elle possède néanmoins des compétences utiles pour la prise en compte de la composante vivante des milieux qui constituent les territoires. Cela dit, c'est bien la première communauté évoquée, sous la dénomination d'« écosystèmes », qui apparaît véritablement proche de l'opérationnel sur des problématiques de gestion des territoires.

Cette faiblesse évidente des forces aptes à s'engager dans des thématiques liées aux applications, de gestion ou d'écoresmédiation est partiellement compensée par quelque 30 à 40 unités de recherche ou de service (y compris des « unités expérimentales » et des UMR avec l'Ina-PG ou les Ensa) de l'Inra et 1 109 statutaires orientés vers les sols et la microbiologie du sol (6 unités, 201 statutaires) les forêts (8 unités, 221 statutaires), les agrosystèmes (12 unités, 368 statutaires), les hydrosystèmes (6 unités, 112 statutaires) – outre 4 unités et 110 statutaires à affichage écologique ou populationnel.

Il est évidemment difficile de dégager la composante véritablement « écologique » dans cette population scientifique, mais il ne paraît pas erroné de considérer qu'elle regroupe des compétences véritablement utiles à des approches écologiques et écosystémiques.

La situation est plus complexe à analyser du côté de l'IRD, même si on peut estimer que 100 à 200 chercheurs doivent être recensés ici, avec des compétences particulièrement significatives sur des systèmes écologiques appréhendés à l'échelle du bassin versant.

Ainsi, les véritables forces préparées à intervenir dans le champ de l'ingénierie des territoires ne se trouvent pas essentiellement au CNRS et dans les universités : il faut se tourner vers les organismes finalisés, très logiquement, pour repérer des unités dont c'est vraiment la priorité. Outre l'Inra déjà évoqué, il convient de s'arrêter sur le Cemagref, qui affiche une telle orientation.

Le Cemagref compte 14 unités de recherche, qui rassemblent 274 agents dont 166 chercheurs et ingénieurs, à vocation « ingénierie des écosystèmes ou des territoires ». Huit, avec 155 agents (dont 92 de niveau chercheur ou ingénieur), touchent aux hydrosystèmes – des ressources aquatiques continentales à l'aménagement des cours d'eau ou la prévention des pollutions – et les 6 autres, qui rassemblent 119 agents (dont 74 chercheurs et ingénieurs), concernent écosystèmes forestiers et paysages ruraux (annexe 2).

1.4. Une absence de l'écologie dans la prise en compte de problèmes de gestion

Développement durable, gestion des ressources renouvelables, émergence d'une économie écologique, conservation et utilisation soutenable de la biodiversité – de partout l'écologie est sollicitée, interpellée.

De fait, la biosphère est aujourd'hui dominée par une espèce, la nôtre. Il est temps d'en tirer toutes les conséquences.

Dans un numéro spécial consacré aux « Human dominated ecosystems » la revue *Science* (vol. 277, 1997) expliquait notamment que :

- 40 % des terres sont transformées, affectées ou gérées par l'homme ;
- plus de 50 % des eaux douces accessibles sont détournées par l'homme (dont 70 % pour l'agriculture) ;
- la fixation d'azote atmosphérique a doublé du fait des activités humaines et la concentration de l'atmosphère en dioxyde de carbone a augmenté de 30 % depuis la révolution industrielle ;
- le taux d'extinction d'espèces s'est vu multiplié par un facteur de 1 000 à 10 000 (estimation discutée, ce qui est vrai pour les oiseaux et autres vertébrés et plantes supérieures, n'étant pas généralisable aux invertébrés et aux micro-organismes) ;
- depuis la dernière guerre, la pression sur les ressources naturelles a, en moyenne, été multipliée par six (Vitousek *et al.*, 1997).

Malgré l'imprécision qui s'attache à ces estimations, elles suffisent pour affirmer que l'homme n'est plus quantité négligeable dans l'histoire et la dynamique de la biosphère et la distance maintenue entre environnement et développement n'a plus lieu d'être. La préservation de l'environnement

ronnement doit être perçue comme une condition du développement, de même que le développement (ce type de développement à promouvoir que l'on qualifie de durable) peut être appréhendé comme un facteur favorable à la préservation des ressources et des services écologiques offerts par la biosphère.

C'est là, comme le chapitre 7, « Analyse économique et sociale » le soulignera, une véritable révolution épistémologique à digérer, aussi bien pour la science économique que pour l'écologie. La principale leçon de la conférence de Rio (1992), au-delà des conventions sur le climat et la biodiversité, est la prise de conscience planétaire de l'interdépendance entre environnement et développement (Pavé, 1997). L'économie environnementale, et plus encore l'économie écologique traduisent bien cette nécessaire évolution (Costanza, 1991 ; Gowdy, 2000 ; Henry, 1990 ; Passet, 1979 ; Weber, 1995).

Là, l'écologie est confrontée à un défi qu'elle n'a pas encore véritablement relevé, quoique tout la prépare à faire du concept de développement durable une réalité opérationnelle (Barbault, 2000)³.

De fait, l'antinomie entre écologie et société industrielle que l'on reproche parfois aux partis « verts » est étrangère au fond théorique et conceptuel de l'écologie *scientifique* (Deléage, 1991).

Trois facteurs expliquent ce malentendu :

1. un biais dans le développement de l'écologie moderne, dominée par les naturalistes (dès lors que la tradition plus biogéochimiste et planétaire, qui fut très avancée dans l'URSS des années 1920-1930, ne réussit pas à s'imposer) et préoccupée par son statut de science rigoureuse et objective ;

2. l'idée largement partagée que la science est indépendante des phénomènes sociaux, économiques et politiques et que les orientations et démarches des scientifiques sont, par définition, objectives ;

3. une vision du monde, chez l'homme occidental du xx^e siècle, très marquée par les « valeurs » de l'économie néoclassique qui va de pair avec une quasi-absence de réflexion et de discussion sur les grands objectifs des sociétés humaines.

On comprend alors que l'écologie pouvait être érigée par ses détracteurs (qui visent davantage l'écologie politique ou l'écologie en tant que mode de représentation du monde qu'une écologie scientifique qui resterait dans le rang) en attitude ou science conservatrice et que l'économie écologique conserve un statut encore très marginal.

3. La traduction opérationnelle du développement durable demeure encore une difficulté. Mais est-ce bien une catégorie scientifique ? Des philosophes proposent d'en faire une catégorie éthique liée à la responsabilité de l'homme actuel face aux générations futures. On retiendra à ce propos un exposé fait par Roberto Barholo (université fédérale de Rio de Janeiro), dans le cadre de « Science et Société » (Rio, 2002), initiative du CNRS en partenariat avec le ministère des Affaires étrangères et diverses institutions brésiliennes.

On comprend également pourquoi les intéressantes ouvertures faites par un René Passet (1979) ici, ou un Ignacy Sachs (1997) là, sont restées ignorées.

Bref, on est loin des conditions favorables à l'émergence d'un véritable débat sur les modalités d'accès à un développement durable – d'une part faute de discussion sur le développement souhaité, les valeurs à promouvoir, le type de société qu'il conviendrait de façonner et d'autre part faute de mise en œuvre des échanges interdisciplinaires indispensables – notamment entre écologie et économie.

Pourtant, contribuer à un fonctionnement durable de la biosphère – c'est-à-dire qui permette l'épanouissement des sociétés humaines actuelles et futures – est un objectif peu contestable et exige une telle rencontre entre économie et écologie.

De fait, l'écologie, *en tant que représentation du monde* plus qu'en tant que science, offre la possibilité d'une telle ouverture interdisciplinaire du débat sur le développement durable, sur les modalités d'une gestion soutenable des écosystèmes de la planète – une écologie rassemblant écologues, biogéochimistes, économistes, sociologues, etc. Une écologie où des réorientations de grande ampleur pourraient être suscitées.

Quant à l'économie, elle apporte le cadre incontournable dans lequel nos sociétés peuvent projeter leur avenir (di Castri, 2000). Les liens entre biologique et économique se créent d'ailleurs dans une discipline émergente : la bioéconomie (Clark, 1985).

Force est de constater que la mobilisation pour répondre à ces sollicitations est lente et encore très limitée, même si dans le champ particulier de l'écologie de la conservation de véritables débats scientifiques se développent sur les dimensions sociales et économiques de la conservation de la biodiversité (Barbault, 1997 ; Czech, 2000 ; Mangel *et al.*, 1996).

Reste que l'écologie dans son ensemble est confrontée là à un véritable défi, une mise à l'épreuve qu'elle se doit de relever, ne serait-ce que pour poursuivre son propre développement.

Inversement, les enjeux de ce que l'on désigne aujourd'hui par l'expression de « développement durable » rendent nécessaire l'intégration d'une perspective écologique (Ayensu *et al.*, 1999 ; Barbault, 2000 ; Costanza, 1991 ; Gowdy, 2000).

On a évoqué les raisons historiques et/ou épistémologiques de ce que d'aucuns sont fondés à qualifier de défaillance de l'écologie scientifique (di Castri, 2000). Il reste à souligner les atouts potentiels d'une écologie renouvelée dans un tel contexte environnemental, une écologie qui inspire aujourd'hui aussi bien la biologie de la conservation que l'économie écologique ou l'écologie industrielle (Allenby, 1999 ; Erkman, 1998).

2 Les atouts d'une écologie d'ouverture

2.1. Des concepts clés pour un aménagement et une gestion durables des territoires

Dans les débats qui s'amorcent, l'écologie apporte des concepts qui devraient favoriser les rencontres interdisciplinaires sans lesquelles l'idée de développement durable restera un vœu pieux et sa prise en compte dans l'aménagement des territoires une vue de l'esprit.

L'écologie dont il est question ici n'est pas tant cette discipline académique façonnée ou délimitée par ses acteurs actuels, handicapée par les cloisonnements qui caractérisent nos institutions de recherche et d'enseignement supérieur – sciences du vivant, sciences de la planète, sciences de l'homme et de la société, sciences de l'ingénieur, etc. – qu'un vaste champ où se mêlent de nombreux courants de pensée, un patrimoine culturel tel qu'il s'est ébauché au long des trois siècles écoulés (Acot, 1988; Deléage, 1991; Drouin, 1991; Worster, 1997). Ainsi, l'écologie du paysage, l'écologie industrielle, l'économie écologique, l'écologie globale – comme la génétique ou l'éthologie – font partie de cette dynamique ouverte – comme les sciences agronomiques.

Voici, brièvement commentée, une liste de quelques concepts qui, par la vision du monde qu'ils induisent, nous paraissent utiles pour une approche efficace des problématiques relatives au développement durable et pour la conception d'un aménagement *écologique* du territoire.

2.1.1. Le concept de système écologique

À une vision atomisée de la nature que nous imposent de prime abord la multiplicité et la diversité des espèces et de leurs styles de vie, le concept de système écologique ou d'écosystème substitue une approche fonctionnelle, intégratrice. Elle souligne l'importance des *interactions* entre espèces, ainsi que des *régulations*, *rétroactions* et *effets différés* qui peuvent résulter d'une telle dynamique systémique.

2.1.2. Le concept de population

Les populations naturelles ne sont pas une somme purement mathématique d'individus ou d'objets identiques mais bien des entités propres, caractérisées par des structures analysables au-delà de la singularité des individus qui les constituent – spatiales, démographiques, éthologiques, génétiques. C'est un objet-clé de la biologie moderne, cible de la sélection naturelle et creuset de l'évolution.

2.1.3. Le concept de métapopulation

Les populations naturelles peuvent avoir une structure morcelée. Il s'agit d'ensembles de populations locales de même espèce caractérisés par des processus d'extinction et de recolonisation locale – essentiels à considérer en biologie de la conservation et dans les sciences de gestion des ressources naturelles.

2.1.4. La théorie de l'évolution par la sélection naturelle

La théorie de l'évolution par la sélection naturelle permet de comprendre les principes de la dynamique des adaptations à un monde changeant dans l'espace et dans le temps.

Elle est essentielle à prendre en compte dans tout projet d'intervention sur le tissu vivant des écosystèmes (lutte contre des ravageurs, gestion d'espèces, etc., voir Holling, 1978). Car on est là bien au-delà des idées simplistes de sélection du « plus fort » ou du « meilleur ». Cette dynamique adaptative s'inscrit en effet dans la trame des systèmes écologiques et affecte autant la coévolution des interactions que la simple évolution de telle ou telle espèce.

Par ailleurs, la lecture écologique de l'évolution permet, à travers la notion de niche écologique, de mieux interpréter les variations de la biodiversité, à l'échelle géologique, en relation avec les perturbations du milieu (Courillot et Gaudemer, 1996; Pavé *et al.*, 2002).

2.1.5. Le concept de recyclage de la matière

Les systèmes écologiques sont des réseaux de populations interconnectées, reliées par des relations mangeurs–mangés qui permettent la circulation de la matière et de l'énergie, cette dernière se dissipant à chaque étape. Ce recyclage de la matière, du carbone, de l'azote, du phosphore, de l'eau, joue un rôle essentiel dans les propriétés de régulation, de stockage et de stabilisation des écosystèmes.

2.1.6. Les notions d'équilibre et de déséquilibre (perturbations, hétérogénéité, probabilité d'extinction, etc.)

Populations et écosystèmes sont caractérisés par des dynamiques qui rendent étrangère à l'écologie scientifique toute idée d'équilibre statique. Les espèces évoluent; les processus d'extinction sont des phénomènes naturels, comme la spéciation qui produit de nouvelles espèces. À l'échelle d'une planète hétérogène dans l'espace et variable dans le temps, la dynamique des systèmes écologiques est caractérisée par des équilibres instables.

2.1.7. L'écologie et les notions de niveau d'organisation et d'échelle

Les systèmes écologiques, de la population à la biosphère, occupent un espace donné et sont le lieu de processus dont les constantes de temps sont aussi spécifiques, ce sont des grandeurs caractéristiques liées aux niveaux d'organisation (chapitre 6, « Infrastructures et moyens de mesure »). Il est bon de souligner que c'est l'écologie qui a le mieux mis en exergue ces notions de niveaux d'organisation du monde vivant.

2.1.8. Le concept de biosphère

Le concept de biosphère, qui promeut l'image d'une Terre machine thermodynamique animée par la Vie – dans le droit-fil de Vernadsky mais aussi de Lovelock et son hypothèse Gaïa (Westbroek, 1998) – ouvre de nouvelles perspectives aux sciences de l'aménagement des ressources et des territoires, où écosystèmes et affaires humaines doivent être appréhendés de conserve. Il impose à l'écologie une vision planétaire très prometteuse.

Ainsi, l'écologie propose une vision du monde qui, sous réserve d'y inclure l'homme à la fois comme espèce animale parmi toutes les autres et comme agent écologique très particulier (ce qui inclut les dimensions sociales et techniques), prépare les hommes du XXI^e siècle à poser et résoudre les problèmes que suppose la mise en œuvre d'un développement durable.

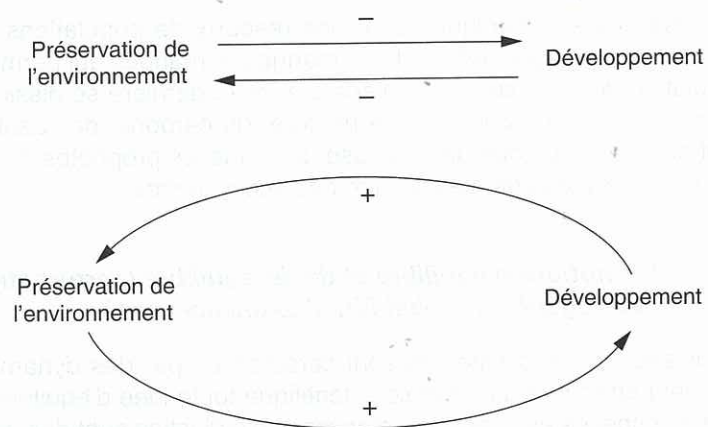


Figure 1.2. De la vision classique des relations environnement/développement (en haut) à la vision écologique (en bas), qui constitue le paradigme clé du développement durable.

L'écologie retrouve là ce qu'énonçait par ailleurs Ignacy Sachs (1997). Bien avant Rio et la mode du « développement durable » on était invité à passer de la vision simpliste d'un antagonisme viscéral entre la préservation de l'environnement d'un côté et les besoins de développement de l'autre à celle, plus réaliste, d'interdépendances et de coévolutions positives entre ces deux objectifs (fig. 1.2. et voir Weber, 1995).

Il est juste de rappeler ici l'histoire du concept de *réserve de biosphère*. C'est en 1974 qu'un groupe de travail du programme « l'Homme et la biosphère » de l'Unesco lance l'idée de réserve de biosphère. L'originalité du concept, par rapport à la philosophie qui prévalait à l'époque en matière de protection de la nature, est de prendre en compte simultanément les objectifs de conservation et de développement – avec en toile de fond une triple perspective de recherche, d'éducation et de culture, essentielle pour promouvoir ce développement durable que tout le monde évoque aujourd'hui.

Dans le cadre de cette toile de fond, où la biosphère et sa dynamique constituent la référence, il devient efficace de mobiliser les connaissances et les techniques, y compris et notamment de modélisation, apportées par une grande diversité de disciplines qui touchent à ce vaste champ où environnement et développement interfèrent.

Dans cette perspective, les exigences de recherches et de suivis à long terme réitérées périodiquement par les écologues préoccupés par la compréhension du fonctionnement des écosystèmes, prennent un relief particulier – tout comme le besoin de réseaux de sites d'observation (Lubchencho *et al.*, 1991 ; Rasmussen *et al.*, 1998, Lévêque *et al.*, 2000).

La modélisation, sous toutes ses formes, devient ici une approche indispensable, un appui et guide d'expérimentations porteurs des approfondissements encore nécessaires (Pavé, 1994).

2.2. L'émergence de l'écologie industrielle

L'émergence de l'écologie industrielle au début des années 1990 (qui aboutit à la création du *Journal of Industrial Ecology* en 1997 et à la publication, peu après, des deux premiers manuels consacrés à cette nouvelle discipline, par Allenby d'une part et Erkman d'autre part) marque probablement une étape essentielle (et une rupture ?) dans l'histoire de l'écologie, dans le sens d'une prise de conscience de l'intégration de l'homme à la biosphère.

L'hypothèse fondatrice de cette nouvelle discipline est qu'il est opérationnel d'envisager le système industriel comme un cas particulier d'écosystème : « Après tout, on peut le décrire comme une certaine

configuration de flux et de stocks de matière, d'énergie et d'information, tout comme les écosystèmes biologiques. De plus, le système industriel tout entier repose sur les ressources et les services fournis par la biosphère, dont il constitue en quelque sorte une excroissance. Il existe ainsi un large spectre d'écosystèmes industriels en interaction plus ou moins directe avec la biosphère, depuis certains écosystèmes agricoles, presque « naturels », jusqu'aux écosystèmes les plus artificiels, comme les vaisseaux spatiaux » (Erkman, 1998).

Trois idées fondent le concept d'écologie industrielle :

- la nécessité d'une vision d'ensemble, intégrée, de toutes les composantes du système industriel et de leur relation avec la biosphère ;
- c'est le substrat biophysique du système industriel, avec la totalité des flux et stocks de matière et d'énergie liés aux activités humaines, qui constitue le champ d'étude de l'écologie industrielle ;
- une dynamique technologique intégrative constitue un facteur crucial pour favoriser la transition du système industriel actuel vers un système viable, inspiré par le fonctionnement de la biosphère.

En d'autres termes, il s'agit pour l'écologie industrielle, en s'inspirant des connaissances sur les écosystèmes et le fonctionnement de la biosphère, de déterminer les transformations susceptibles de rendre le système industriel compatible avec un fonctionnement « normal » des écosystèmes de la planète. L'étude du *métabolisme industriel* en constitue un préalable indispensable. C'est « l'étude de l'ensemble des composants biophysiques du système industriel. Cette démarche, essentiellement analytique et descriptive, vise à comprendre la dynamique des flux et des stocks de matière et d'énergie liés aux activités humaines, depuis l'extraction et la production des ressources jusqu'à leur retour inévitable, tôt ou tard, dans les processus biogéochimiques » (Erkman, 1998).

On comprend mieux l'originalité de cette approche en l'opposant à la vision traditionnelle qui sépare le monde de l'industrie de la biosphère et traite des impacts des activités humaines selon la « philosophie » du *end of pipe* des anglo-saxons : on traite les pollutions de façon cloisonnée et linéaire, en bout de chaîne, par des dispositifs techniques appropriés. Les idées de cycle, d'interdépendance sont négligées.

On l'a compris, l'écologie industrielle est une discipline intégrative, comme la biologie de la conservation. Elle privilégie les relations entre systèmes, comme le fait l'écologie des paysages – *on pourrait dire que c'est l'écologie des paysages industriels!*

Mais cette intégration multisystémique pousse à une forte interdisciplinarité que ne facilitent pas la culture scientifique moderne et l'organisation de nos structures académiques, éducatives, scientifiques et techniques. La figure 1.3. souligne bien les liens qui existent entre l'écologie industrielle d'une part et les systèmes naturels, les systèmes technolo-

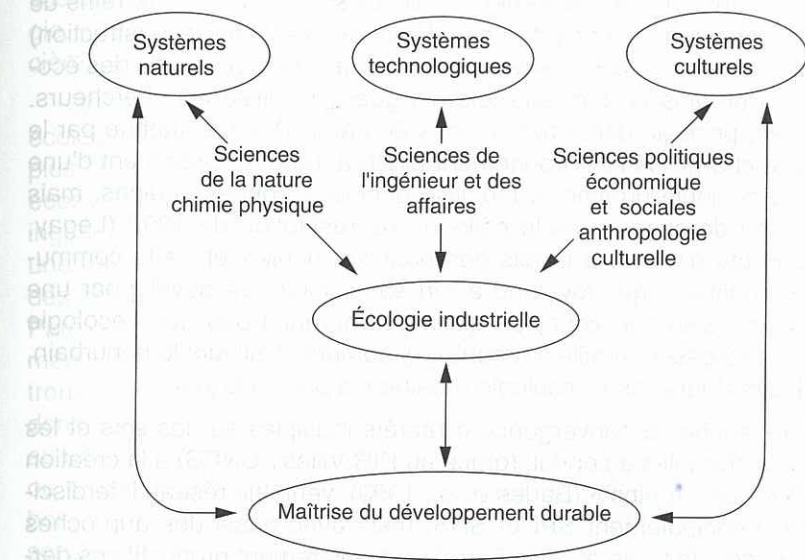


Figure 1.3. L'écologie industrielle en tant que champ intégratif multidisciplinaire propice à l'émergence d'une véritable ingénierie écologique (adapté d'après Allenby, 1999).

giques et les systèmes culturels d'autre part, ainsi que les rétroactions avec ce qui constitue la matrice du développement durable.

Ce profond élargissement de l'écologie, qui répond à ses principes fondamentaux et dont on peut trouver les prémices dans *La biosphère* de Wladimir Vernadsky (1926, nouvelle édition française 1997), permet d'envisager l'émergence d'une véritable *ingénierie écologique*, sensiblement différente par sa vision d'ensemble des pratiques actuelles de l'ingénierie de l'environnement, si l'on suit Allenby (1999b). Ici, il est clair qu'agriculteurs et agronomes, héritiers d'une longue et riche tradition d'ingénierie de la nature, sont appelés à jouer un rôle de premier plan.

Sur ces bases, le si nécessaire dialogue entre sciences de la nature et sciences sociales, et spécialement entre écologie et économie, peut s'instaurer. Pour peu que l'on aborde alors le problème des *valeurs*, propre à notre statut *d'être humain*, les défis de la gestion durable deviennent à notre portée – comme la perspective d'un aménagement écologique du territoire.

2.3. Un parent pauvre : l'écologie urbaine

Les quelques tentatives (parfois anciennes) pour développer en France une recherche en écologie urbaine n'ont guère abouti. En

dehors de quelques travaux sur des milieux spécifiques (les terrains de Bercy laissés en friche des dizaines d'années avant leur reconstruction) ou des espèces particulières (étourneaux, rats, blattes), l'étude des écosystèmes urbains en tant que tels n'a guère mobilisé les chercheurs. L'initiative, prise au début des années 80 par le Piren, soutenue par le ministère chargé de l'Environnement et l'Inra, de développement d'une véritable écologie urbaine, a mobilisé quelques bonnes équipes, mais n'a pas eu de suite après le colloque de restitution de 1992 (Legay, 1991). Faute d'intérêt à la fois des pouvoirs publics et de la communauté scientifique qui voyaient, à tort sans doute, se développer une écologie de seconde zone, ou qui ne comprenait pas que l'écologie puisse s'intéresser au milieu urbanisé (y compris d'ailleurs le périurbain, bien délaissé lui aussi), l'écologie urbaine n'a pas vu le jour.

En revanche, la convergence d'intérêts multiples sur les sols et les sous-sols des villes a conduit (grâce au PIR Villes / CNRS) à la création du GIS « Sols urbains » (Barles *et al.*, 1999), véritable réseau interdisciplinaire (principalement SPI et SHS, mais avec aussi des approches des sciences de la vie et de la Terre) particulièrement productif ces dernières années.

La France semble ainsi mieux placée dans le concert scientifique international sur ce thème des sols urbains que sur celui des écosystèmes urbains.

2.4. Le besoin d'une ingénierie des systèmes écologiques

L'écologie s'est donc développée sur le plan académique : aujourd'hui elle s'unifie de plus en plus sur des bases théoriques solides. Elle étend son champ en considérant l'homme et ses actions. Elle a largement progressé sur le plan méthodologique (Legay et Barbault, 1995). Mais que peut-elle apporter concrètement en matière de gestion des systèmes écologiques ? On remarquera d'abord que ses composantes populationnelles ont déjà apporté des solutions à des problèmes concrets de gestion des populations, sans parler de son rôle moteur dans l'élaboration et le développement de la lutte biologique (Lebreton, 1981 ; Riba et Silvy, 1989). Les ingrédients sont réunis pour élaborer une véritable écologie opérationnelle ; mais, au-delà des exemples ponctuels et d'une profession de foi, il s'agit maintenant de tracer les contours d'une ingénierie des systèmes écologiques.

2.5. Points de repères

Le mot ingénierie nous vient de l'anglais *engineering*. Suivant le dictionnaire, il désigne : « 1. La conception, l'étude globale d'un projet (industriel) sous tous ses aspects (techniques, économiques, financiers,

sociaux), coordonnant les études particulières de spécialistes. Par analogie, il désigne le savoir-faire dans différents domaines (ingénierie financière) [...]. 3. Discipline d'application scientifique. Ingénierie génétique. »⁴

On remarque que cette définition ne fait pas référence aux systèmes écologiques. Et pourtant, des ingénieurs s'occupent depuis longtemps, plus ou moins explicitement, de ces systèmes (écosystèmes forestiers, écosystèmes aquatiques, écosystèmes marins). Ainsi, le corps des ingénieurs des Eaux et Forêts a été constitué vers 1850 et s'appuie sur une tradition beaucoup plus ancienne. Des ingénieurs se sont occupés des pêches maritimes dès le XVIII^e siècle (par exemple, Le Masson du Parc ou Duhamel du Monceau) et par là même, plus ou moins directement, des écosystèmes marins. Là encore, on pourrait probablement trouver des références plus anciennes. Les aspects techniques n'ont donc pas été ignorés. Cependant, leur approche n'était pas écologique au sens moderne du terme. Les forestiers s'intéressaient plus à l'arbre ou à la collection d'arbres qu'à la forêt : l'objectif était de produire du bois. Les ingénieurs des pêches réservaient plus leur attention aux poissons et aux techniques de pêche qu'aux écosystèmes marins : l'objectif était de pêcher du poisson et de préserver la ressource, même à une époque où elle n'était manifestement pas menacée. Enfin, chacun était spécialisé dans l'étude d'un objet spécifique⁵. Même un ingénieur des eaux et forêt s'occupant de la forêt n'intégrait pas ou peu la dimension hydrologique. C'est encore très souvent le cas.

Dans un premier temps, on pourrait admettre que l'ingénierie écologique recouvre les applications techniques de l'écologie, tous systèmes écologiques confondus (déclinaison de la définition 3 du dictionnaire). Mais cette définition est loin d'épuiser le sujet. De nombreux projets écologiques mobilisent plusieurs disciplines (déclinaison de la définition 1). Par ailleurs, on sait que l'ingénierie des systèmes industriels n'a pas fait que mobiliser des connaissances existantes, mais elle a posé des questions originales qui ont pu conduire à la définition de nouveaux secteurs scientifiques (par exemple, le génie des procédés ou l'automatique). Cette constatation a été faite au CNRS au milieu des années 1970 et s'est traduite par la création du département des Sciences phy-

4. Le nouveau Petit Robert (Ed. 1993).

5. Le cas de Duhamel du Monceau (1700-1782) mérite cependant d'être souligné. Peu connu du grand public, et même traité modestement par les dictionnaires, il est l'auteur d'une œuvre gigantesque sur les pêches, sur les forêts, sur l'agriculture. Il a rédigé plusieurs articles pour l'Encyclopédie. Bien qu'il n'ait apparemment pas fait de fortes connexions entre les domaines de son savoir, il examinait avec attention les différentes facettes de son objet d'étude. Ainsi à propos des pêches, il décrit les espèces pêchées et les engins pour les pêcher. Il évoque même les pêcheurs. On pourra consulter la réédition de son ouvrage (Duhamel du Monceau, 1769-1782, réédition 1998).

À l'occasion du troisième centenaire de sa naissance, l'Académie des sciences et l'Académie d'agriculture de France lui ont rendu récemment un fort juste hommage.

siques pour l'ingénieur. Plus tard, ce département devait s'intituler : département des Sciences pour l'ingénieur, en gardant le même sigle : SPI. L'ingénierie des systèmes écologique nécessite-t-elle le développement d'un tel secteur : sciences pour l'ingénierie des systèmes écologiques ? Ou ne relèverait-elle que d'une application de l'écologie ?

2.6. Les systèmes écologiques et leur ingénierie

Très schématiquement, rappelons que la notion de système écologique recouvre l'ensemble des entités des niveaux d'organisation du monde vivant supérieur à l'individu, de la population à l'écosystème. On peut approximativement relier ces niveaux avec des échelles d'espace et de temps (encadré 2 et chapitre 5 « Échelles et changements d'échelles : problématiques et outils »). Ces entités sont plongées dans un milieu naturel, semi-naturel ou artificiel. Ce milieu a des composantes biologiques (autres populations, communautés, peuplements) et géophysicochimiques (sol, air, eau). Il est structuré dans l'espace et change dans le temps. L'entité concernée interagit avec les autres composantes du milieu dans lequel elle est plongée. Elle évolue dans le temps. Elle se distribue dans l'espace. Elle participe à la structuration de cet espace et à l'évolution du milieu.

Intervenir sur des systèmes écologiques, notamment par des techniques, demande de prendre en compte ces diverses dimensions. Si on considère à nouveau la rencontre de l'écologie avec la technique, on peut avancer qu'elle s'est faite de deux manières :

- ▶ Par le rapprochement des ingénieurs et des scientifiques⁶

D'une part, on ne peut plus agir sur les systèmes écologiques sur une base purement technique : une intervention se traduit par une interférence avec le fonctionnement de ces systèmes. Par exemple, les forestiers ont adopté un point de vue écologique au tournant des années 1990. Ainsi, les textes fondateurs du GIP Ecofor rompaient nettement avec la tradition forestière⁷. Certes, il faut encore produire du

6. Par exemple, on pourra remarquer que dans le chapitre consacré à l'aménagement du territoire de l'*Encyclopédia Universalis* (édition de 1977), l'écologie n'est pas évoquée comme discipline contributrice.

7. On notera que ces textes fondateurs ont été écrits par Jean-François Lacaze, qui avait été directeur du département forêt de l'Inra et du Cemagref. Pour illustrer ce changement de point de vue, on pourra consulter la collection des bulletins techniques de l'ONF. Longtemps consacrés à la sylviculture, on trouve, à partir de 1995 des numéros exprimant nettement une vision écosystémique : le CO₂ et la forêt (N° 29, 1995), la lumière et la forêt (n° 34, 1997), L'eau et la Forêt (n° 37, 1999). Cette vision est particulièrement sensible dans l'ouvrage destiné au grand public : une forêt pour les hommes 1966-1996, 30 ans de passion (Arborescence, ONF, 1996).

bois, mais dans un contexte nouveau de gestion qu'on pourrait qualifier d'écosystémique. D'autre part, l'évolution de la discipline permet de rencontrer les préoccupations des ingénieurs. Par exemple, l'approche spatiotemporelle des systèmes écologiques permet de prendre en compte l'espace géographique et donc de construire un discours pertinent face aux problèmes d'aménagement de cet espace. Ou encore, l'unification du champ écologique converge avec la préoccupation de plus en plus affichée de **gestion intégrée** des systèmes ruraux et urbains ;

- ▶ Intérêt de plus en plus affirmé de l'écologie à développer un secteur technologique

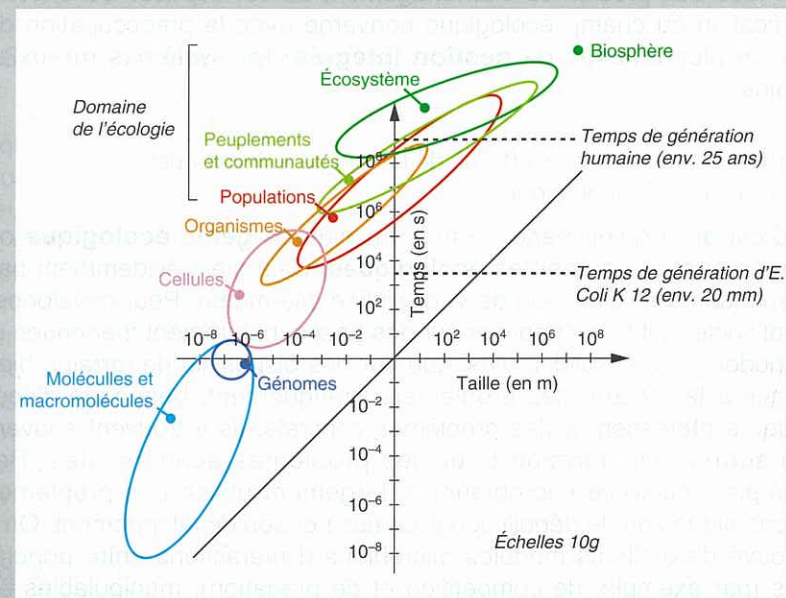
C'est ainsi qu'on parle de plus en plus de **génie écologique** ou **d'ingénierie des systèmes écologiques**. Cela n'est évidemment pas indépendant de l'évolution de la discipline elle-même. Pour développer un tel secteur, il faut s'appuyer sur des bases, notamment théoriques et méthodologiques, solides ainsi que sur des dispositifs de terrains bien conçus à la mesure des problèmes. Pratiquement, beaucoup d'écologues s'intéressent à des problèmes concrets. Ils y trouvent souvent une source d'inspiration pour des problèmes académiques. Par exemple, l'écologie microbienne a largement utilisé des problèmes agronomiques ou de dépollution pour assurer son développement. On y a trouvé d'excellents modèles microbiens d'interactions entre populations (par exemple, de compétition et de prédation), manipulables en laboratoire et dont les dynamiques se décrivent bien avec les modèles différentiels de Lotka-Volterra. En retour, ces modèles ont ainsi acquis un statut opérationnel pour le contrôle de ces populations.

Cerner les contours d'une ingénierie des systèmes écologiques a déjà fait l'objet de débats. On comprend bien qu'elle se distingue de l'ingénierie écologique présentée ci-dessus. Mais comment aller plus loin dans sa définition ? À cette fin, le programme « Environnement, vie et sociétés » du CNRS avait créé un groupe de réflexion sur le sujet, mais la composition trop académique de ce groupe a limité les ambitions initiales. La question a été à nouveau soulevée dans un rapport récent à la direction scientifique du Cemagref (Pavé, 1999). Un comité thématique vient d'être créé sur le sujet dans le cadre de l'ACI « Écologie quantitative ». Enfin, le programme « Environnement, vie et sociétés » a relancé le débat en créant un séminaire sur le sujet. Cela étant, s'il est encore prématuré de définir précisément « l'ingénierie des systèmes écologiques », on peut néanmoins en citer quelques caractéristiques :

1. elle s'appuie principalement sur les **acquis de l'écologie**, mais a recours, autant que de besoin, à d'autres disciplines ;
2. elle effectue des **études d'impacts**, c'est-à-dire l'identification et l'évaluation des conséquences des activités humaines sur les systèmes écologiques ;

Encadré 2

Relations approximatives entre les niveaux d'organisation biologique et les échelles d'espace et de temps



Les systèmes vivants sont hiérarchisés en niveaux d'organisation, de la macromolécule (protéines, acides nucléiques) aux écosystèmes et à la biosphère. Chaque niveau est caractérisé par des propriétés qui sont en partie héritées des niveaux inférieurs et d'autres qui n'ont de sens qu'à ce niveau. Par exemple, la notion de nourriture n'a aucun sens au niveau des macromolécules, elle n'en a qu'au niveau des organismes, sachant que des organismes peuvent être unicellulaire (micro-organismes). De même, pour celle de sexualité. La notion de génération ne se rencontre qu'à partir du niveau populationnel. Les temps qui caractérisent les processus sont liés à la taille des systèmes et à la viscosité des milieux. Cela se comprend aisément : beaucoup d'entre eux sont les conséquences d'interactions et dépendent donc des distances entre les objets et des vitesses de déplacement, qui elles-mêmes dépendent de la taille de ces objets (ces tailles sont rapportées à une distance linéaire). L'écologie situe son domaine d'intervention de la population à la biosphère, correspondant donc à une grande variété d'échelles d'espace et de temps. Elle doit cependant prendre en compte les autres niveaux d'organisation. La diversité biologique, question centrale des sciences du vivant, s'observe du « gène à l'écosystème ».

© Lavoisier - La photocopie non autorisée est un délit

3. elle propose des **indicateurs** caractérisant l'état d'un système écologique et permettant de suivre son évolution ;
4. elle conçoit des procédures et des techniques de **diagnostic et de surveillance** ;
5. grâce à des études de scénarios, elle prévoit les **effets possibles** d'actions humaines alternatives sur les systèmes écologiques. De ce fait, elle participe à la prise de décision ;
6. elle définit des **modes d'action** permettant de conduire un système écologique dans un état donné, choisi à l'avance sur des critères précis, et de le maintenir dans cet état ou au voisinage de cet état (passer du « que se passe-t-il si... ? » au « que faut-il faire pour... ? ») ;
7. elle est concernée par les **problèmes de restauration, de réhabilitation et de préservation des écosystèmes** ;
8. elle participe de plus en plus à la **gestion et à l'aménagement des territoires** ;
9. elle doit promouvoir une **vision intégrée** de la gestion des systèmes écologiques ;
10. elle s'appuie largement sur des **modèles**, de plus en plus intégrés, formalisant le fonctionnement des systèmes écologiques et permettant d'étudier les effets des actions sur ces systèmes ;
11. elle doit inciter au **développement de recherches scientifiques** spécifiques pour répondre aux problèmes qui lui sont posés et qu'elle se pose.

De fait, l'ingénierie des systèmes écologiques ne fait pas appel uniquement à l'écologie, mais mobilise d'autres disciplines et des secteurs méthodologiques variés. En premier, on peut citer l'écologie et l'ensemble de ses spécialisations (par exemple, l'écologie théorique, l'écologie systémique, l'écophysiologie, la dynamique et la génétique des populations). Ensuite les sciences du milieu physique sont interpellées (pédologie, aérologie, hydrologie, océanologie). Des méthodologies spécifiques sont développées : la modélisation, l'analyse spatiale, la bio-informatique et ce qu'on pourrait qualifier de « sciences du contrôle des systèmes biologiques et écologiques » (étude des régulations et des contrôles spécifiques aux systèmes biologiques et écologiques)⁸. Enfin, des disciplines des sciences de l'homme et de la société sont aussi concernées : géographie, économie, sociologie, his-

8. Notons au passage que des outils et des concepts et des méthodes de l'automatique ont déjà été utilisés et adaptés pour le suivi et le contrôle de systèmes biologiques (par exemple, en génie des procédés biologiques ou en biomédecine pour la définition de posologies optimales, ou encore dans certains procédés agricoles, par exemple l'irrigation). Pour ce qui est des systèmes écologiques, le cadre de référence a été utile, mais les applications concrètes sont encore très limitées. Il faut aussi se souvenir qu'une part importante des développements théoriques de l'automatique est fondée sur la théorie des systèmes et la cybernétique, largement construites sur le paradigme biologique.

© Lavoisier - La photocopie non autorisée est un délit

toire et les sciences politiques qui étudient diverses fonctions du contrôle social sur les systèmes écologiques.

En ce sens on peut parler de sciences pour l'ingénierie des systèmes écologiques. Rien qu'en considérant la partie la plus écologique, ce secteur doit se fonder sur les connaissances de bases, acquises ou à acquérir, sur les processus spontanés en œuvre dans les systèmes écologiques. Mais ces connaissances sont, le plus souvent, insuffisantes pour définir des modes d'action. Ce qui distingue ce secteur par rapport à l'écologie, c'est la définition scientifique de ces modes d'action, des méthodes à mettre en œuvre et des moyens techniques à concevoir et à utiliser pour y parvenir.

Des recherches spécifiques doivent être développées à ces fins, en particulier pour définir des fondements théoriques permettant de concevoir des technologies et leurs modes d'utilisation, en général plus simples et plus fiables que ceux qui sont bâtis sur l'empirisme ou la simple compilation des connaissances factuelles. Enfin, ces recherches doivent s'appuyer sur des dispositifs expérimentaux solides, conçus à la mesure des enjeux. C'est pour cette raison notamment que le réseau des stations LTER (*Long Term Ecological Research*) aux États-Unis évolue vers le dispositif Neon (*National Ecological Observatory Network*) et que le programme « Environnement, vie et sociétés » du CNRS a lancé une initiative sur le sujet (Lévêque *et al.*, 2000). Par ailleurs, le ministère chargé de la Recherche a pris l'initiative de compléter ce dispositif par la création d'ORE (Observatoires de recherche en environnement). On reviendra sur ces questions au chapitre 6, « Infrastructures et moyens de mesure ».

Enfin, la finalité de l'exercice consiste en « l'élaboration d'outils et de méthodes pour la gestion et l'aménagement durable des territoires », comme le précise le texte de cadrage de l'ACI « Écologie quantitative » (encadré 4).

2.7. Quelques problèmes concrets

À titre d'exemples, on peut citer quelques problèmes concrets qui relèveraient d'une ingénierie des systèmes écologiques ou à l'étude desquels cette ingénierie peut contribuer.

► Couplage terrestre et aquatique continental (voire littoral)

Ce couplage est traité avec plus de détails aux chapitres 3 « Eaux continentales » et 4 « Gestion des zones côtières ». Il joue sur deux registres, celui d'unifier le langage entre les communautés et celui d'avoir une approche de plus en plus intégrée des systèmes écologiques des eaux continentales et des systèmes écologiques terrestres. La prise en

compte du littoral est plus délicate. En effet, elle se heurte à une barrière institutionnelle et administrative⁹. Et pourtant, tant du point de vue du fonctionnement des systèmes écologiques que des usages qui en sont faits, le littoral se rapproche plus des systèmes des eaux douces et de l'usage « agricole » que de ceux de la grande mer, du large ou du hauturier. De plus, ces systèmes sont sous l'influence directe de ce qui vient du continent. Une approche scientifique mènerait à implanter la borne institutionnelle au-delà du littoral, aux limites du plateau continental.

► Biodiversité et gestion des populations naturelles

La question de la biodiversité avec tous ses aspects, posée au départ par les scientifiques, médiatisée, est érigée en question « sociale », notamment depuis la conférence de Rio (1992). Elle devient une préoccupation essentielle des gestionnaires. Par exemple, l'Office national des forêts (ONF) l'inclut explicitement pour la gestion des systèmes forestiers. Elle se prête à une recherche scientifique originale et de bonne qualité. Elle répond à une préoccupation très actuelle. De plus, la connaissance de certains systèmes (par exemple, montagnards) peut conduire à l'étude de l'influence des **variations climatiques** sur ces systèmes, notamment par le biais de l'évolution de leur diversité biologique. Enfin, la problématique de la biodiversité rencontre encore celle des variations climatiques, *via* celle des gaz à effet de serre : l'émission ou le stockage de ces gaz par les écosystèmes sont-elles dépendantes de leur biodiversité ?

On touche là l'un des enjeux futurs de la gestion des systèmes écologique : celui de se fonder sur plusieurs critères. Par exemple, un système forestier devra continuer à produire du bois, il devrait être diversifié (peuplements multispécifiques), il devrait aussi, tant que faire se peut, constituer un puit de carbone et enfin, il devrait être géré comme espace de loisir. On sait aussi que sa gestion ne peut pas se fonder uniquement sur celles des arbres et des plantes, mais doit intégrer les animaux, le sol et l'eau, la circulation de l'homme. Il s'agit donc d'une gestion multicritères et multivariables loin de celle qui ne concernait que la production de bois vue à travers les « tarifs de cubages ».

► Techniques et règles de gestion intégrée des systèmes diversifiés, notamment des écosystèmes, pour l'aménagement du territoire

Les processus de diversification s'imposent actuellement, tant du point de vue biologique qu'agronomique, ou plus généralement tech-

9. Historiquement, rappelons que la limite entre eaux douces et salées, qui partage les domaines « continentaux et maritimes » est fondée sur le « plus grand flot de mars » depuis l'ordonnance de 1681 (*Ordonnance de Louis XIV Roy de France et de Navarre. Donnée à Fontainebleau au mois d'Aouft 1681. Touchant la Marine*. Paris : D. Thierry et Ch. Ballard, 1681 - (voir Pavé M., 2000)). Elle est toujours en vigueur.

nique ou socio-économique. Par exemple, les systèmes forestiers qui se mettent, plus ou moins spontanément, en place sont loin du schéma monospécifique et d'âge homogène qui a prévalu dans un passé encore récent: on aboutit le plus souvent à des forêts multispécifiques. Les exploitations agricoles diversifient leurs techniques, leurs cultures et leurs élevages. Diversité interexploitation, diversité intra-exploitation et dynamique de cette diversité, les agriculteurs ont des stratégies de plus en plus adaptatives. La notion de filière a perdu sa pertinence au bénéfice de celle de système de production. Enfin, avec l'évolution du secteur, intégrant des fonctions nouvelles, par exemple de gestion des paysages, la « multifonctionnalité » de l'agriculture devient une réalité. On reviendra au chapitre 2, « Dynamiques des territoires: les changements de couverture et d'utilisation des terres », sur cette famille de problèmes, à l'occasion de la gestion de la « couverture » des sols.

L'approche systémique se substitue à celle d'approche linéaire. On pourrait multiplier les exemples. La nécessité d'imaginer des modes et techniques de gestion des systèmes diversifiés est donc à l'ordre du jour.

D'un autre côté, il y a une non moins grande nécessité d'élaborer une vue intégrée des systèmes, associant diverses spécialités ou disciplines (par exemple, d'études couplées entre écologie terrestre et écologie aquatique, encadré 3). L'un des objectifs principaux est évidemment de gérer et d'aménager des territoires. Que faire? Comment? Et où? Sur ce type de problème, les aspects méthodologiques ne sont pas négligeables. Cette problématique a été très clairement explicitée dans un travail de prospective récent de l'Unesco (Bindé, 1999).

Enfin, il faut souligner que les concepts de l'écologie ont largement dépassé son champ traditionnel, celui de notre nature préhensible. Le développement de l'écologie microbienne a montré que les populations de micro-organismes pouvaient être abordées en utilisant ces concepts. Cette écologie microbienne ne fait pas que dissenter des micro-organismes dans le milieu naturel, mais aussi dans des systèmes très artificialisés comme les fermenteurs, ou dans des organismes supérieurs: ainsi parle-t-on de l'écosystème intestinal chez l'homme. Des récents progrès en virologie sont du même ordre. La révolution dans la vision des infections virales, au tournant des années 1995, doit beaucoup à une vision populationnelle du problème. Il est à noter que ce transfert de concept est largement passé par la modélisation¹⁰. On peut espérer

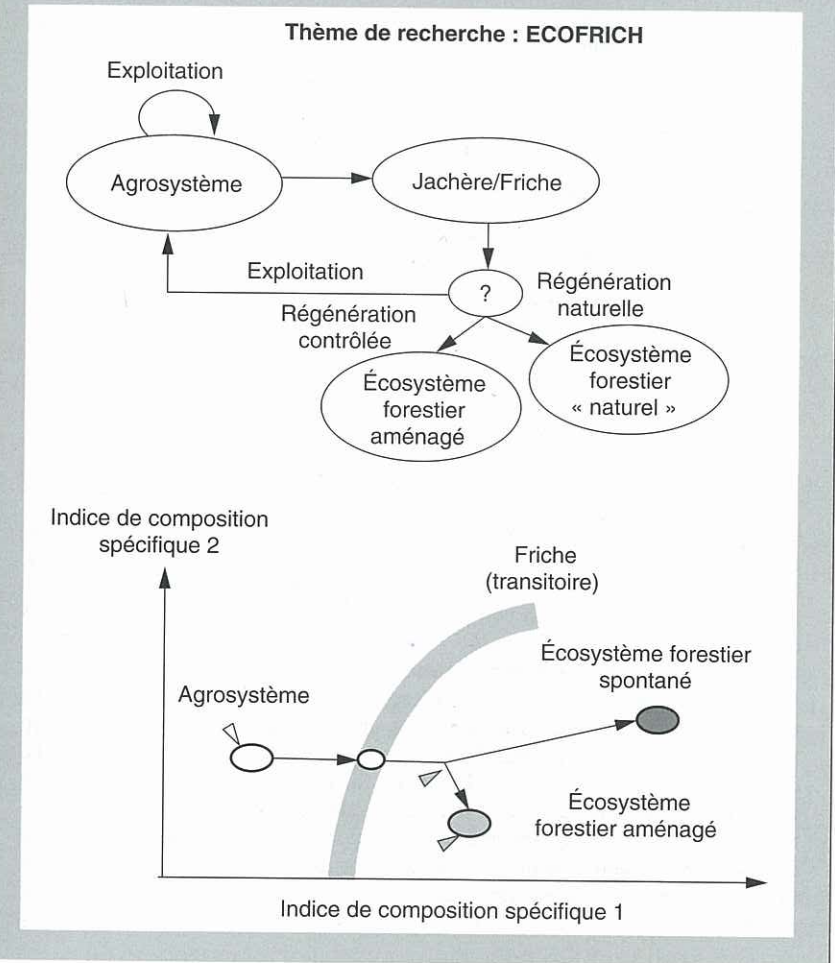
10. L'un des meilleurs exemples est sans doute l'utilisation de concepts et de modèles mathématiques issus de l'écologie pour mieux comprendre le processus d'infestation d'un organisme par le VIH. Les articles de Wei *et al.*, d'une part, et de Ho *et al.*, d'autre part, dans *Nature* (*Nature*, 373, 1995, 117-122 et 123-126) ont ainsi remis complètement en cause les hypothèses en cours sur la « furtivité » du virus. À ce sujet, on pourra également consulter les travaux de Nowack *et al.* (*Nature*, 375, 1995, 606-611).

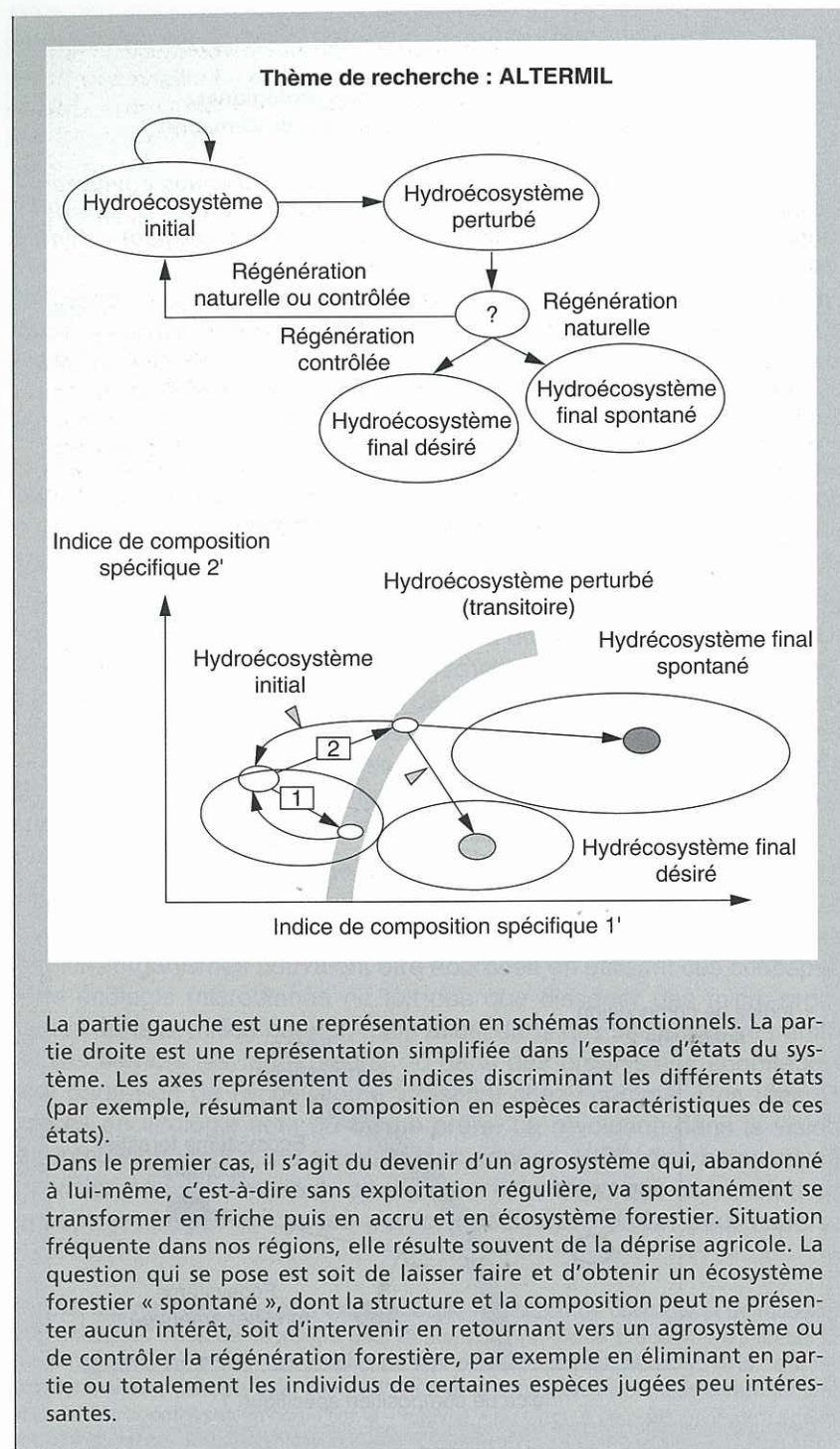
Encadré 3

Vers une ingénierie des systèmes écologiques:
exemple de deux thèmes de recherche du Cemagref

Cet exemple montre que des concepts généraux de l'écologie peuvent s'adapter à des situations apparemment différentes. C'est sur la base de tels concepts, des outils et des méthodes qui en dérivent, que peut se fonder une écologie opérationnelle.

Le Cemagref a organisé son activité scientifique en thèmes de recherche. Nous donnons ici l'exemple de deux de ces thèmes: ECOFRICH (Dynamique des écosystèmes soumis aux modifications de l'environnement et des usages traditionnels) et ALTERMIL (Effets des apports allochtones sur les milieux aquatiques, évaluation des altérations et de la capacité d'assimilation des écosystèmes). Conçus indépendamment ils ont, en fait, des problématiques similaires.





Dans le second cas, il s'agit de l'évolution d'un hydroécosystème suite à une perturbation naturelle (par exemple une crue) ou d'origine anthropique (par exemple une pollution). Une « faible » perturbation (1) le déplace de son état. Spontanément, il peut y revenir. Une plus « forte » perturbation (2), peut le mener dans un autre état. Le retour à l'état initial ou arriver au voisinage d'un état souhaité à l'avance peut être possible par une action adaptée (flèches grisées), par exemple épuration, introduction d'espèces aquatiques, ouvrages hydrauliques, aménagement du cours d'eau et de ses berges.

Donc dans les deux cas, il s'agit, à partir d'un écosystème pris dans un état donné, soit de restaurer cet état (restauration qui peut être spontanée) soit de le conduire, grâce à des actions « calculées » et dont les conséquences sont suivies au cours du temps, au voisinage d'un autre état décidé à l'avance.

On retiendra au passage que l'un des risques dans la réflexion écologique est de penser à l'unicité d'un état « naturel » dit à l'équilibre et qu'après une perturbation, le retour se fera spontanément. Ce n'est pas un système « homéostatique », l'état final peut être très différent de l'état initial par le jeu de la recombinaison de relations entre populations et entre celles-ci et leur milieu. Il peut même y avoir une infinité d'états possibles. Pour arriver à un état « désiré » remplissant certaines fonctions, une intervention doit le plus souvent être prévue. C'est le rôle du « génie écologique ». Ces schémas sont évidemment simplistes, mais ils ont l'avantage de montrer similarités et différences et peuvent être la base de l'établissement d'un dialogue et d'une réflexion commune entre communautés scientifiques.

que les développements que connaîtra l'ingénierie des systèmes écologiques permettront de tels transferts.

2.8. Les acteurs de l'ingénierie des systèmes écologiques

Les principaux instituts de recherche concernés par les problèmes environnementaux et la gestion des systèmes ruraux ont vocation à développer ce secteur (BRGM, Cirad, Cemagref, Ifremer, Inra, IRD). Le CNRS et le secteur universitaire associé est aussi au premier plan. Nombre de ses laboratoires ont déjà investi en la matière, souvent d'ailleurs en relation avec des équipes d'autres instituts. Les gestionnaires des milieux sont non seulement des clients potentiels ou avérés, mais ont aussi vocation, pour nombre d'entre eux, à participer à ces développements. C'est le cas, par exemple de l'ONF, déjà cité, mais c'est aussi celui des agences de l'eau pour les hydrosystèmes; l'ONC (Office national de la chasse), gestionnaire de la faune sauvage terrestre, et le CNP (Conseil national de la pêche) sont aussi impliqués. Enfin, l'Ifen a pour tâche de maintenir des bases de données sur les milieux, de proposer des indicateurs de leurs qualités et de publier régu-

lièrement un état de l'environnement en France. L'une des questions actuelles n'est pas l'implication de chacun de ces acteurs, dans le champ de leurs missions, mais de promouvoir une véritable coopération interorganisme et interinstitutionnelle.

3 ■ Une révolution à accomplir

3.1. Les nécessités de changements d'échelles, d'ouverture interdisciplinaire

Pour faire face aux défis que pose l'objectif d'un aménagement durable des territoires, l'écologie doit accomplir une véritable révolution.

Il lui faut en effet être capable de passer d'échelles locales, où opèrent les mécanismes qu'elle étudie, à des échelles régionales, continentales et planétaires où se posent les problèmes. Il lui faut également prendre en compte les dimensions sociales et économiques de ces derniers. Il lui faut enfin s'inscrire dans l'action. Elle doit s'inscrire dans la logique des chapitres 5, « Échelles et changements d'échelles : problématiques et outils », 6, « Infrastructures et moyens de mesure » et 7, « Analyse économique et sociale ».

Bref, l'heure est venue de s'orienter vers une véritable écologie de la biosphère, une macro-écologie (Nee, 2002).

3.1.1. Équilibres et déséquilibres planétaires

Posé à l'échelle de la planète, le concept de développement durable suppose que l'on donne une place centrale aux grands flux de matière et d'énergie qui la modèlent et à l'évolution des systèmes vivants qui l'habitent. C'est d'ailleurs l'intuition majeure des écoles de pensée qui se consacrent à l'étude du « métabolisme » de la Terre et des sociétés qui la peuplent, parmi lesquelles on peut citer des noms comme E.P. Odum (1953), R. Ayres (Ayres & Leslie, 1996), R. Costanza (Daily, 1997), B. Allenby (1999). Réfléchir à ces flux et à ces systèmes, c'est évidemment poser la question des cycles que décrivent les éléments les plus fondamentaux, qu'ils soient simples comme le carbone, l'azote ou le phosphore, ou composés comme l'eau. Envisager l'évolution des systèmes vivants, c'est poser la question de la biodiversité et de sa dynamique.

Lorsqu'il parcourt son cycle, un élément traverse les différents « compartiments » que sont l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère (*sensu stricto*: ensemble des êtres vivants). Pour faire progresser la connaissance, il est donc nécessaire de faire collaborer des

disciplines très différentes qui se sont consacrées à chacun de ces compartiments.

L'étude des cycles est largement entamée, en particulier pour le premier d'entre eux, le cycle du carbone : la présence de cet élément dans l'atmosphère (sous la forme de CO₂) constitue en effet le problème central de la climatologie. On peut considérer que l'effort fait à propos du carbone constitue le modèle de ce qu'il faudrait faire pour d'autres cycles, en insistant toutefois sur les interactions (par exemple entre C, N et eau).

La description de ces cycles et de leur évolution au cours du prochain siècle demande que l'on modélise la dynamique de la biosphère au sens large (*sensu* Vernadsky ou Westbroek). Cela n'exclut pas de travailler à l'échelle de sous-systèmes tels que « terres agricoles », « forêts tempérées », « forêts tropicales », etc. Comme toujours dans l'étude des grands systèmes, on ne peut ni isoler les parties du tout, ni traiter celui-ci comme un ensemble homogène.

3.1.2. Faire progresser les études aux échelles intermédiaires et locales

On doit toujours rappeler que les problèmes de développement durable ou de bouclage des cycles ne peuvent être posés de façon rigoureuse qu'au niveau de la planète elle-même. Néanmoins, la contribution des différents continents mérite d'être étudiée et fait l'objet d'affrontements politiques (qu'il s'agisse du CO₂ ou de rejets dans l'océan). Par ailleurs, les conséquences de l'accumulation de certains éléments (par exemple les métaux lourds) seront de plus en plus étudiées et discutées à l'échelle continentale ou même régionale.

Ainsi, la problématique des cycles est pertinente aux très grandes échelles, alors qu'elle a de moins en moins de sens lorsqu'on se rapproche de l'échelle locale. En revanche, la **méthodologie garde toute son efficacité quelle que soit l'échelle** : collaboration interdisciplinaire entre les différents compartiments, modélisation du système et des sous-systèmes (hydrosphère, sols et biosphère), systématique dans le recueil, l'organisation et la validation des données.

Cette méthodologie peut être définie en peu de mots : c'est l'« **approche systémique** » qui devient aujourd'hui possible (au-delà du discours), grâce au progrès faits dans l'acquisition des données et dans la modélisation. Cette approche est la seule possible au niveau d'un système comme la « planète Terre ». Mais elle est pleinement justifiée dans l'étude d'un « territoire », étude qu'on ne peut découper en visées indépendantes (hydrologie, biodiversité, économie...).

3.1.3. Aux échelles locales, aller jusqu'à l'ingénierie

Avec la réduction de l'échelle, apparaît la possibilité d'organiser l'action selon des méthodes « à l'échelle humaine », et de définir une véritable « ingénierie des territoires », qui sera l'ingénierie des interactions de l'homme et de l'environnement. Deux raisons poussent fortement dans ce sens :

- d'une part, l'étude des grandes échelles montre déjà que des évolutions importantes auront lieu. Il ne serait évidemment pas raisonnable de traiter ces problèmes de façon uniquement globale et « délocalisée ». Il faudra bien, si l'on veut être clair au niveau des impacts, tenir compte des interactions locales qui définissent ce que l'on appelle un « territoire » ;

- d'autre part, il est temps que les décideurs (au niveau local) bénéficient d'une approche scientifique qui prenne en compte toutes les interactions, et d'abord les pressions (ou « forçage ») venant des échelles supérieures, comme on vient de l'indiquer.

Ces deux raisons conduisent à renforcer et à décloisonner (toujours l'approche du système) les méthodes de l'ingénierie classique. Depuis longtemps, celle-ci s'occupe d'étudier les impacts de nouveaux ouvrages (ponts, voies de circulation, digues, etc.) ou de décisions d'aménagement (reboisement, assèchement de zones humides, ...), voire d'évaluer les risques naturels. Le patrimoine de connaissances ainsi accumulé est loin d'être négligeable, mais il souffre de l'approche cloisonnée qui a été adoptée, et de l'existence de points de vue disciplinaires dominants. Il faut donc faire dialoguer entre eux ces différents points de vue, et proposer **l'étude de l'évolution globale des territoires**, avec cette capacité intégratrice que devrait offrir la « nouvelle écologie » envisagée ici.

Toutes ces questions commencent – aux États-Unis, en Europe ou au Japon – à faire l'objet de programmes de recherche. En France, les programmes déjà cités : le GICC (Gestion des impacts du changement de climat), le programme SEAH (Systèmes écologiques et action de l'homme), ainsi que les programmes nationaux PNSE et PNRZH (sols et érosion, zones humides), l'ACI « Écologie quantitative », montrent que la nécessité de regarder les problèmes d'environnement de façon intégrée mais à l'échelle régionale ou locale commence à être bien perçue. L'Académie des sciences peut donc offrir un lieu de réflexion et d'expression à une communauté qui est en train de s'organiser.

3.2. Les initiatives porteuses

Au cours de ces dix dernières années de nombreux programmes et actions ont été lancés en France autour de problèmes relatifs à l'environnement (voir rapport d'Alain Pavé : *Les recherches sur l'environnement en France*, 2001, CSRT).

Tous ont pu contribuer, de près ou de loin, à préparer la communauté scientifique à cette révolution nécessaire.

Cependant, si l'on s'en tient à l'affichage « écologie » développé ici, on relève en fait essentiellement trois initiatives récentes qui paraissent s'inscrire dans la dynamique souhaitée – outre le mouvement de fond entrepris au niveau international depuis deux décennies à travers le programme international « Géosphère-biosphère » (PIGB), lequel constitue ici un cadre incontournable et irremplaçable.

Ces trois initiatives sont les suivantes :

1. le programme sur les « Systèmes écologiques et l'action de l'homme » (SEAH) du programme interdisciplinaire de recherche « Environnement, vie et sociétés » du CNRS (PEVS), prolongé par une réflexion de fond sur le concept de « zones ateliers : espaces d'observation sur le long terme, méthodes et instrumentation », déjà mentionnée ;
2. la réflexion entreprise sur l'ingénierie des systèmes écologiques par le Cemagref, l'Inra et le PEVS ;
3. l'action coordonnée incitative « Écologie quantitative » lancée par le ministère de la Recherche à l'automne 1999.

Dans la mesure où cette dernière action s'appuie, entre autres, sur les deux initiatives précédentes et en intègre la philosophie, on se bornera ici à reprendre le texte de cadrage de cette ACI (encadré 4).

Il faut souligner que cette dynamique nationale s'inscrit dans une toile de fond internationale où l'on peut relever, par exemple, la création du programme Linkecol de l'ESF (1999-2002) et celle du programme Biocomplexity de la NSF.

3.3. Les changements structurels à promouvoir

Si l'on revient un instant sur les obstacles au développement de l'écologie en France et sur les insuffisances intrinsèques de la discipline énoncées dans ce chapitre, il est clair qu'une action forte est nécessaire, qui change la géométrie habituelle du dispositif français de recherche et qui échappe à l'éternelle, et relativement vaine, accumulation de programmes indépendants quoique souvent partiellement redondants.

Apparaît nécessaire la mise en place d'une structure de programmation nationale, renforçant la coordination interorganismes et susceptible d'assurer aussi bien la cohérence de la diversité des initiatives prises par telle ou telle « agence » (organisme de recherche, ministère) que le développement des infrastructures et dispositifs expérimentaux nécessaires.

Cela nécessite une initiative particulière. Il ne s'agit évidemment pas d'ajouter une énième structure à un dispositif de recherche qui souffre

Encadré 4

Action concertée incitative « Écologie quantitative »

Les grands problèmes d'environnement présentent presque tous une dimension écologique : impacts des changements climatiques, pollutions, conservation et utilisation durable des ressources biologiques et des services écologiques, développement d'une agriculture et foresterie durables...

L'écologie (*sensu lato* c'est-à-dire de sa composante génétique à sa dimension « planétaire »), par ses grandes problématiques et son cadre épistémologique général structuré autour des concepts de population, d'écosystème et de biosphère, est l'« outil » privilégié des sciences de la nature pour un accès efficace à l'espace de recherche et d'application de la recherche qu'offre l'environnement, à l'interface des sciences de l'homme et de la société et des sciences de l'Univers.

Pour progresser significativement dans nos connaissances et notre capacité de maîtrise des écosystèmes continentaux, terrestres et aquatiques, il est nécessaire : (1) de mobiliser et de structurer une communauté scientifique actuellement dispersée entre une grande diversité de disciplines (écologie, climatologie, science du sol, géochimie, sciences de la Terre, hydrologie, chimie, agronomie...) et d'organismes ; (2) d'organiser la recherche autour de dispositifs expérimentaux et de sites d'observation à long terme.

► L'action « Écologie quantitative »

Dans cette perspective, l'action concertée « Écologie quantitative » a pour objectif principal **de développer des études sur les équilibres et les déséquilibres des systèmes écologiques complexes**, des ensembles de populations en interaction à la biosphère tout entière.

Les travaux soutenus devront coupler **approches de modélisation et expérimentations**. Il s'agit en effet, au-delà d'un légitime accroissement des connaissances, de mettre en place des éléments de prévision permettant d'apprécier le sens et l'ampleur des évolutions des structures des populations, peuplements et écosystèmes analysés et d'éviter les conséquences néfastes éventuelles pour l'homme et l'environnement.

L'action « Écologie quantitative » contribuera :

- à structurer une communauté interdisciplinaire autour de questions scientifiques touchant à la structure, au fonctionnement et à l'évolution des écosystèmes terrestres, mais aussi d'équipements collectifs, de sites expérimentaux, d'« observatoires écologiques » à long terme ;
- à faire de l'écologie écosystémique une discipline solidement implantée à l'interface des sciences de la vie, des sciences de la Terre et de l'atmosphère, tournée vers l'expérimentation et la modélisation, apte à aborder dans les meilleures conditions un domaine complexe où le sol, l'eau, la végétation, le climat, les communautés animales ou microbiennes et les effets des activités humaines doivent être étudiés en très étroite coordination ;

- à favoriser l'émergence d'une véritable ingénierie écologique, pertinente dans les problèmes d'aménagement, de restauration des milieux, de « bioremédiation », d'agronomie « propre », de gestion « durable » des ressources terrestres ou aquatiques, d'écologie industrielle.

► Les moyens d'intervention

L'action « Écologie quantitative » s'appuiera sur la mise en place d'un grand **programme de recherche sur la dynamique de la biosphère continentale** mobilisant les équipes concernées des EPST et Epic et des universités, autour des axes suivants :

- connaissances fondamentales sur les processus des grands cycles biogéochimiques de la surface, du local au planétaire ;
- relations réciproques entre changements climatiques et fonctionnement des écosystèmes terrestres et aquatiques continentaux ;
- développement d'une ingénierie écologique, en relation avec l'évaluation des services écologiques, l'écologie de la restauration et les problèmes d'aménagement et gestion des territoires ;
- relations entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes (en liaison avec le programme national « Biodiversité ») ;
- observations à long terme.

Parallèlement, **trois actions spécifiques** ciblées sur des points critiques de ce vaste champ seront engagées :

1. une action **biogéochimie des sols**, centrée sur l'étude des interfaces systèmes biologiques-solutions-phases solides-phases gazeuses, ainsi que sur le rôle des acteurs microbiens ;
2. une action incitative destinée à renforcer les interfaces mathématiques/écologie autour de la **modélisation de systèmes écologiques complexes et de leur évolution** ;
3. une action interdisciplinaire ciblée sur l'émergence d'une véritable **ingénierie écologique**, à l'interface des sciences de l'homme et de la nature, et l'élaboration **d'outils et de méthodes pour la gestion et l'aménagement durable des territoires**.

d'en avoir déjà trop. La solution pourrait être de faire de l'Insu un Insue, Institut national des sciences de l'Univers et de l'environnement, en élargissant le spectre de ses compétences (vers l'écologie et les sciences de l'homme et de la société autant que vers les sciences de l'ingénieur) et en le déconnectant de la direction des sciences de l'Univers du CNRS. Un tel institut, ouvert sur l'ensemble des disciplines nécessaires et la totalité des organismes de recherche concernés, fondamentaux et appliqués, fort de son expérience de la gestion des grands programmes et des grands instruments, y compris dans leur dimension européenne et internationale, serait à même de rendre enfin

opérationnelle cette écologie de la biosphère, et cette ingénierie des systèmes écologiques et des territoires dont on vient de souligner l'impérieux besoin.

L'un des objectifs prioritaires d'une telle structure serait la mise en place et le développement de dispositifs expérimentaux d'observation et de recherche à long terme, en s'appuyant sur ce qui est déjà opérationnel.

Pour la plupart, les programmes internationaux ne financent pas directement des recherches. Ils structurent le champ scientifique. Beaucoup utilisent leurs comités scientifiques pour l'évaluation des projets nationaux et délivrent ainsi des « labels ». Les instances nationales de ces programmes sont, elles, soutenues par les agences ou organismes des pays concernés. En revanche, les programmes européens ou ceux qui sont lancés par quelques grandes agences nationales ou internationales, comme le *Global Environment Funds* (GEF) ou le « Fonds français pour l'environnement mondial » (FFEM) bénéficient du soutien direct de ces agences.

Par ailleurs, il existe des **réseaux nationaux et internationaux de dispositifs de terrain**. On reviendra sur ce sujet au chapitre 6, « Infrastructures et moyens de mesure ». Il convient de citer, en particulier :

- **Pour la surveillance**, l'exemple qui nous semble actuellement le plus avancé dans sa réalisation est l'*Environmental Change Network* (ECN) au Royaume-Uni : 48 sites, distribués sur l'ensemble du territoire, sont actuellement en service (26 sur les rivières, 18 sur les lacs, 12 terrestres). Plus de 150 paramètres (physicochimiques et biologiques) sont enregistrés en continu ou périodiquement, avec un pas de temps variant du jour à l'année. Aucune donnée socio-économique n'est à proprement parler enregistrée. Une base de données centralisée a été constituée, accessible pour des besoins de recherche. Ce réseau s'intéresse plus particulièrement :

- aux grandes tendances ;
- aux événements extrêmes ;
- à la dynamique des écosystèmes ;
- au développement d'indicateurs sur l'évolution du climat et sur la qualité de l'eau.

Il est soutenu par 15 organismes gouvernementaux (ministères, dont l'équivalent du MAP, NERC, agence de l'environnement) et régionaux¹¹.

- **Pour la recherche**, on peut se référer au réseau des sites *Long-Term Ecological Research* (LTER) mis en place par les États-Unis depuis le début des années 80. Le réseau actuel compte 24 stations (6 en 1981, 20 en 1996 et 24 en 2000), comme son nom l'indique, il est très orienté vers des objectifs de recherche (académique) pour l'instant et ne remplit

11. Page web : www.ecn.ac.uk

pas, à proprement parler, le rôle d'un réseau d'observatoires. Il dispose d'un système d'information depuis 1981. Depuis 1997, deux sites en milieux urbain et périurbain ont été mis en place (Baltimore et Phoenix).

Un réseau international *International Long Term Ecological Research* (ILTER) a été mis en place sous l'initiative américaine, selon les mêmes principes.

Le projet *National Ecological Observatory Network* (Neon) devrait prendre la suite à partir de 2002. Des discussions sont en cours entre la National Science Foundation (NSF), principal bailleur de fonds, et le CNRS pour coupler leurs efforts et partager leurs expériences.¹²

Le réseau des *zones atelier du CNRS* est déjà constitué de 10 zones labellisées : le bassin de la Seine, la baie du Mont-Saint-Michel, les îles subantarctiques (Kerguelen, Nouvelle-Amsterdam, Crozet)¹³, la plaine d'Alsace, le bassin du Rhône, le littoral du Golf du Lyon, le bassin de la Loire, la région Bretagne, les savanes d'Afrique de l'Ouest et une zone de fronts pionniers en Amazonie brésilienne. Des opérations spécifiques seront faites dans le Dom-Tom, notamment en Guyane.

Le réseau international Fluxnet se met en place pour l'étude des échanges entre forêt-atmosphère (trois sites de ce réseau ont été mis en place en France dans le cadre du sous-réseau Euronet (cf. Schmidt-Lainé, *op. cit.*)).

Enfin, rappelons que le réseau du programme *Man and biosphere* (MAB) des réserves de la biosphère a une composante recherche importante.

Recommandations

Suite à cet état des lieux et aux perspectives qui sont envisagées, trois recommandations principales peuvent être énoncées :

1. Soutenir l'émergence d'une écologie opérationnelle, une ingénierie écologique et des systèmes écologiques, composante fondamentale d'une ingénierie des territoires dont l'expression synthétique, déjà esquissée ici, est proposée dans le chapitre suivant « Dynamiques des territoires ».

2. Insister sur la nécessaire interdisciplinarité, fréquemment prônée, mais trop peu souvent réalisée, sans laquelle ces ingénieries ne pour-

12. Accès internet : internet.edu. Une réunion d'une semaine s'est tenue début janvier 2002 à Versailles, regroupant des scientifiques américains (LTER) et français (Zones ateliers). Cette réunion a été soutenue par la NSF et par le CNRS. Le Cemagref et l'Inra étaient représentés.

13. Sur cette zone précise on pourra consulter le dossier de *Pour la Science* « La vie sur les îles antarctiques » (*Pour la Science*, juillet 2001, 285, 30-51).

ront se développer; traduire enfin cette nécessité sur le plan institutionnel (institut(s) spécialisé(s), procédures d'évaluation adaptées).

3. Développer en priorité les axes suivants :

- la dynamique de la biodiversité, notamment à l'échelle locale et globale, problématique qui se place progressivement au centre de l'écologie et des préoccupations des gestionnaires, des économistes et des politiques;
- la biologie de la conservation, notamment pour la définition et la gestion des espaces protégés;
- l'étude des « écosystèmes-sols », tout particulièrement les mécanismes bio-écologiques et biogéochimiques;
- l'écologie des zones urbanisées, urbaines et périurbaines trop négligée, devenue essentielle pour l'aménagement de ces espaces;
- l'écologie des systèmes intertropicaux, qui entrent dans la catégorie des problèmes du « Sud », que ce rapport ne traite pas, mais où la France peut jouer une carte importante grâce à ses territoires outre-mer.

Références bibliographiques

- Acot P** (1988). *Histoire de l'écologie*. Presse Universitaire de France, Paris.
- Allenby B** (1999a). *Industrial ecology. Policy framework and implementation*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Allenby B** (1999b). Earth systems engineering: the role of industrial ecology in an engineered world. *J Industrial Ecology*, 2: 73-92.
- Ayensu E, et al.** (1999). International ecosystem assessment. *Science*, 286: 685-686.
- Ayres R, Leslie W** (1996). *Industrial ecology: towards closing the materials cycle*. Edward Elgar, Cheltenham (UK).
- Barbault R** (1990). *Écologie générale. Structure et fonctionnement de la biosphère*. Masson, Paris, 270 p.
- Barbault R** (1996). *L'écologie, une science de la nature à l'épreuve d'enjeux de société. Natures-Sciences-Sociétés*, 4: 372-380.
- Barbault R** (1997). Biodiversité. Introduction à la biologie de la conservation. Hachette, Paris.
- Barbault R** (2000). La vie, un succès durable. *Natures-Sciences-Sociétés*, 8: 40-46.
- Barles S, Breysse D, Guillerme A, Leyval C** (1999). *Le sol urbain*, Anthropos, Paris, 284 p.
- Begon M, Harper JL, Townsen CR** (1996). *Ecology. Individuals, Populations and Communities*. Blackwell Science, Oxford, 1068 p.
- Bindé J (sous la direction de)** (1999). *Le Monde de demain*. Odile Jacob-Unesco, 1999.
- Bousquet F** (1993). Des milieux, des poissons, des hommes: étude par simulations multi-agents. Thèse, Université Claude Bernard, Lyon I.

- Bousquet F, Cambier C, Mullon C, Morand P, Quensièrre J, Pavé A** (1993) Simulating the Interaction Between a Society and a Renewable Resource. *Journal of Biological Systems*, 1: 2, 199-214.
- Brown JH** (1995). *Macroecology*. The University of Chicago Press, Chicago.
- Brown JH** (1999). Macroecology: progress and prospect. *Oikos*, 87: 3-14.
- Charvolin F** (1994). L'invention de la biosphère. *Natures, Sciences et Sociétés*, 2: 21-28.
- Courtilot V, Gaudmer Y** (1996). Effects of mass extinction on biodiversity. *Nature*, 381, 6578, 146-148.
- Clark WC** (1985). *Bioeconomic modelling and fisheries management*. John Wiley & Sons, New York, 291 p.
- Czech B** (2000). The importance of ecological economics to wildlife conservation. *Wildlife Society Bulletin*, 28 (special coverage): 2-69.
- Costanza R (ed)** (1991). *Ecological economics. The science and management of sustainability*. Columbia University Press, New York.
- Daily GC (ed)** (1997). *Nature's services: Societal dépendance on naturel ecosystems*. Island Press, Washington, D.C.
- Di Castri F** (2000). Ecology in a context of economic globalization. *Bioscience*, 50: 321-332.
- Deléage JP** (1991). *Histoire de l'écologie. Une science de l'homme et de la nature*. La Découverte, Paris.
- Drouin JM** (1991). *Réinventer la nature: l'écologie et son histoire*. Desclée de Brower, Paris.
- Duhamel du Monceau H-L** (1769-1782). *TRAITÉ GÉNÉRAL DES PESCHES et des poissons qu'elle fournissent, tant pour la subsistance des hommes que pour plusieurs autres usages qui ont rapport aux Arts et au Commerce*. Réédition 1998, Connaissance et mémoires européennes, 3 tomes et planches.
- Erkman S** (1998). *Vers une écologie industrielle*. Ed. Charles Léopold Mayer, Paris.
- Golley FB** (1993). *A history of the ecosystem concept in ecology*. Yale University Press, New Haven.
- Gowdy JM** (2000). Terms and concepts in ecological economics. *Wildlife Society Bulletin*, 28: 26-33.
- Henry C** (1990). Efficacité économique et impératifs éthiques: l'environnement en copropriété. *Revue économique*, 41.
- Holling CS (ed)** (1978). *Adaptive environmental assessment and management*. Wiley & Sons, New York.
- Kingsland SE** (1985). *Modeling nature*. The University of Chicago Press, Chicago.
- Lebreton JD** (1981). *Contribution à la dynamique des populations d'oiseaux. Modèles mathématiques en temps discret*. Thèse de doctorat ès sciences, Lyon.
- Legay JM, Barbault R (eds)** (1995). *La révolution technologique de l'écologie*, Masson, Paris.
- Lévêque C** (2001). *Écologie, de l'écosystème à la biosphère*. Dunod, Paris.
- Lévêque C, Pavé A, Abbadie L, Weill A, Vivien F-D** (2000). Les zones ateliers, des dispositifs pour la recherche sur l'environnement et les anthroposystèmes. *Natures-Sciences-Sociétés*, 8: 44-55.
- Lubchenco J** (1998). Entering the century of the environment: a new social contract for science. *Science*, 279: 491-497.
- Lubchenco J, et al.** (1991) The sustainable biosphere initiative: an ecological research agenda. *Ecology*, 72: 371-412.

- Malthus T** (1978). *Essai sur le principe de population*. Paris, Gauthier, 1963.
- Mangel, et al.** (1996). Principles for the conservation of wild living resources. *Ecological applications*, 6: 338-362.
- Möbius K** (1877). *Die Auster und die austern-wirtschaft*. Verlag von Wiegandt, Hempel & Parey, Berlin.
- Nee S** (2002), Thinking big in ecology. *Nature*, 417: 229-230.
- Odum E** (1953). *Fundamentals of ecology*. W.R. Saunders, Philadelphia.
- Passet R** (1979). *L'économie et le vivant*. Payot, Paris.
- Pavé A** (1994). *Modélisation en biologie et en écologie*. Aléas Éditeur, Lyon.
- Pavé A** (1997). Environnement et développement: approches scientifiques, structuration du domaine et co-évolution des recherches. *Natures-Sciences-Sociétés*, 5, 1: 50-63.
- Pavé A** (1999). *Les Sciences et Technologies du Vivant au Cemagref*. Rapport à la Direction scientifique du Cemagref, 1999, 52 p.
- Pavé A, Hervé JC, Schmidt-Lainé C** (2002). Mass extinctions, biodiversity explosions and ecological niches. *Comptes Rendus Biologies*, 325, 7: 755-765.
- Pavé M** (2000). *Réglementation et organisation de la pêche côtière en France (1715-1850)*, thèse de doctorat d'histoire, Paris IV – Sorbonne, 426 p.
- Rasmussen PE, et al.** (1998). Long-term agroecosystem experiments: assessing agricultural sustainability and global change. *Science*, 282: 893-896.

- Riba G, Silvy C** (1989). *Combattre les ravageurs des cultures. Enjeux et perspectives*. Inra, Paris.
- Sachs I** (1997). *L'écodéveloppement. Stratégie pour le XXI^e siècle*. Syros, Paris.
- Schmidt-Lainé C** (1999). *Les échanges forêts-atmosphère: Le cas du CO₂. Potentiel de recherche, questions scientifiques, protocole de Kyoto*. Rapport à l'Académie des sciences, 19 p.
- Thompson WR** (1922). Théorie sur l'action des parasites entomophages; les formules mathématiques des parasites cycliques. *C.R. Académie des Sciences*, 174: 1433-1435 et 1647-1649.
- Verhulst PF** (1844). Recherche mathématique sur la loi d'accroissement de la population. *C.R. de l'Académie Royale de Belgique*, XVIII, 1-32.
- Verhulst PF** (1846). Deuxième mémoire sur la loi d'accroissement de la population. *C.R. de l'Académie Royale de Belgique*, XX, 3-32.
- Vernardsky W** (1997). *La biosphère*. Diderot Éditeur, Paris.
- Vitousek PM, Mooney HA, Lubchenco J, Melillo JM** (1997). Human domination of earth's ecosystems. *Science*, 277: 494-499.
- Weber J** (1995). *Gestion des ressources renouvelables: fondements théoriques*. Cirad-Green, ronéo.
- Westbroek P** (1998). *Vive la Terre. Physiologie d'une planète*. Éditions du Seuil, Paris.
- Worster D** (1977) (traduction française 1993). *Les pionniers de l'écologie*. Sang de la terre, Paris.

Annexe 1

Les unités de recherche rattachées à la section 30 du CNRS

A1.1. Unités à orientation ou composante « écosystèmes continentaux »

Intitulé de l'unité	Lieu et directeur	Ch/E-C	ITA/IATOS	Σ	*
Écologie des hydrosystèmes fluviaux	Lyon (Amoros)	26 (6)	15 (5)	41	p
Centre d'études biologiques de Chizé	Beauvoir/Niort (Duncan)	9 (8)	16 (16)	25	
Centre d'écologie des systèmes aquatiques continentaux	Toulouse (Autiol)	28 (10)	25 (18)	53	
Laboratoire d'écologie terrestre	Toulouse (Blasco)	28 (10)	17 (13)	45	
Fonctionnement des écosystèmes et biologie de la conservation	Rennes (Burel)	56 (15)	25 (9)	71	p
Fonctionnement et évolution des systèmes écologiques	Paris (Clobert)	35 (19)	19 (14)	54	p, g
Institut méditerranéen d'écologie et paléoécologie	Marseille (de Beaulieu)	47 (14)	19 (9)	66	
Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive	Montpellier (Delay)	48 (36)	49 (45)	97	p, g
Écosystèmes lagunaires: organisation biologique et fonctionnement	Montpellier (Do Chi)	16 (7)	10 (6)	26	p
Fonctionnement, évolution et mécanismes régulateurs des écosystèmes forestiers tropicaux	Brunoy (Erard)	14 (10)	13 (13)	27	p
Écologie, systématique et évolution	Orsay (Gouyon)	39 (10)	29 (17)	68	p, g
Centre d'études spatiales de la biosphère	Toulouse (Menaut)	23 (3)	15 (8)	38	
Biologie comparée des protistes	Clermont (Amblard)	28 (7)	13 (3)	41	p
Biogéochimie isotopique	Paris (Mariotti)	6 (2)	9 (2)	15	
Structure et fonctionnement des systèmes hydriques continentaux	Paris (Tabbag)	40 (9)	18 (4)	58	

**A1.2. Unités à orientation ou composante
« écosystèmes marins côtiers »**

Intitulé de l'unité	Lieu et directeur	Ch/E-C	ITA/IATOS	Σ
Diversité biologique et fonctionnement des écosystèmes marins côtiers	Marseille (Boudouresque)	28 (21)	11 (9)	39
Centre d'étude d'océanographie et de biologie marine	Roscoff (Lallier)	31 (18)	8* (8) * +32 OSU (25)	39
Environnements et paléo-environnements océaniques	Talence (Buat-Ménard)	58 (20)	57 (16)	115
Laboratoire d'océanographie et de biogéochimie	Marseille (Coste)	30 (16)	10 (9) + 15 OSU	40
Laboratoire des sciences de l'environnement marin	Brest (Clavier)	23 (10)	14 (6)	37
Écosystèmes littoraux et côtiers	Wimereux (Dauvin)	50 (2)	19 (3)	69
Centre de recherche en écologie marine et aquaculture	L'Houmeau (Gentien)	22 (8)	15 (9)	37
Récifs coralliens	Perpignan (Pichon)	7 (2)	5 (1)	12

* Autre composante importante : g = génétique ou évolution ; p = écologie des populations

A1.3. Unités à orientation « génétique ou évolution »

Intitulé de l'unité	Lieu et directeur	Ch/E-C	ITA/IATOS	Σ
Biométrie et biologie évolutive	Lyon (Gautier)	36 (14)	1536 (10)	51
Génome, populations, interactions	Montpellier (Bonhomme)	15 (6)	10 (8)	25
Populations, génétique et évolution	Gif (Cariou)	23 (13)	13 (13)	36
Plasticité et expression des génomes	Grenoble (Geiselmann)	10 (3)	7 (2)	19
Génétique et biologie des populations de crustacés	Poitiers (Martin)	9 (2)	6 (2)	15
Institut des sciences de l'évolution	Montpellier (Pasteur)	45 (26)	31 (21)	76
Centre d'études sur le polymorphisme des microorganismes	Montpellier (Tybayrenc)	11 (5)	7 (3)	18
Génétique et évolution des populations végétales	Lille (Valero)	12 (2)	9 (3)	21

A1.4. Unités à orientation « organismes ou populations »

Intitulé de l'unité	Lieu et directeur	Ch/E-C	ITA/IATOS	Σ
Institut de recherche sur la biologie de l'insecte	Tours (Casas)	25 (3)	15 (7)	40
Botanique et bioinformatique de l'architecture des plantes	Montpellier (Houllier)	24 (4)	11	35
Biologie des populations d'helminthes parasites	Perpignan (Jourdane)	13 (6)	6 (2)	19
Parasitologie évolutive	Paris (Koella)	10 (4)	2 (1)	12
Centre d'écologie et physiologie énergétiques	Strasbourg (Le Maho)	17 (14)	17 (16)	34
Biologie des échanges entre plantes et bactéries rhizosphériques	Marseille (Leguay)	24 (8)	13 (3)	37
Origine et structure de la biodiversité des insectes	Paris (Najt)	10 (4)	3 (2)	13
Écologie microbienne	Lyon (Normand)	27 (10)	20 (10)	47
Biologie des populations d'altitude	Grenoble (Taberlet)	14 (3)	4 (2)	18
Éthologie, évolution, écologie	Rennes (Hausberger)	15 (7)	13 (7)	28
Biogéosciences	Dijon (David)	28 (17)	17 (5)	45
Adaptation et évolution des systèmes ostéomusculaires	Paris (Renous)	14 (6)	5 (4)	19

Notes: (1) ce tableau donne la situation 2001. Depuis, certaines UMR ont changé de configuration et de directeur (notamment à Toulouse). (2) Les chiffres entre parenthèses indiquent les effectifs CNRS.

Annexe 2

Unités de recherche du Cemagref à dominante écologique et ingénierie des systèmes écologiques

	Intitulé de l'unité	Lieu et directeur	Ch/Ingénieurs statutaires	Nb Total agents
UR	Hydrobiologie	Aix (Yann Le Coarer)	6	10
UR	Qualité et fonctionnement des systèmes aquatiques	Antony (Jean-Luc Pujol)	16	28
UR	Qualité des eaux	Bordeaux (François Delmas)	9	18
UR	Ressources aquatiques continentales	Bordeaux (Paul Gonthier)	15	24
ERT	Aménagement et restauration des cours d'eau à poissons migrateurs amphihalins	Toulouse (Michel Larinier)	6	9
UR	Biologie des écosystèmes aquatiques	Lyon (Marc Babut)	20	27
UR	Qualité des eaux et prévention des pollutions	Lyon (Jean-Joël Gril)	14	28
UR	Ressources ichthyologiques en plan d'eau	Montpellier (Jean-Pierre Proteau)	6	9
UR	Agriculture et forêt méditerranéennes	Aix (Jean-Jacques Tolron)	11	17
UR	Agriculture et dynamique de l'espace rural	Bordeaux (Ramon Laplana)	12	16
UR	Dynamique et fonctions des espaces ruraux	Clermont (Joël Chové)	17	29
UR	Agriculture et milieux montagnards	Grenoble (Philippe Cozic)	10	15
UR	Écosystèmes et paysages montagnards	Grenoble (Bénédicte Boisseau)	12	20
UR	Écosystèmes forestiers et paysages	Nogent-sur-Vernisson (Micl Denis)	12	22

Annexe 3

Les principaux écosystèmes

« Le terme écosystème a été introduit par Tansley en 1935 pour nommer un concept écologique holistique qui combine dans un seul système les organismes vivants et leur environnement physique (les facteurs d'habitat au sens large). » (Lévêque, 2001).

Objet scientifique difficile à cerner, on peut en fait proposer plusieurs typologies en fonction du critère retenu.

Écosystèmes classés par catégories géomorphologiques

- Les écosystèmes continentaux de plaine, de moyenne montagne et montagnards
- Les écosystèmes insulaires
- Les écosystèmes marins

Écosystèmes classés par zones bioclimatiques

- Les écosystèmes intertropicaux, secs et humides
- Les écosystèmes tropicaux et subtropicaux désertiques
- Les écosystèmes méditerranéens
- Les écosystèmes tempérés
- Les écosystèmes subpolaires
- Les écosystèmes polaires

Écosystèmes classés suivant la couverture végétale

- Les écosystèmes forestiers (intertropicaux, des zones sèches et humides, méditerranéens et tempérés, boréaux)
- La toundra (système arboré et clairsemé)
- Les systèmes herbacés (savanes, steppes, prairies)

Écosystèmes classés en fonction des milieux

- Les écosystèmes terrestres
- Les écosystèmes aquatiques

Les écosystèmes hybrides et interfaces

- Les zones humides
- Les zones littorales
- Les ripisylves

Les écosystèmes résultants de l'activité humaine

- Les agroécosystèmes
- Les systèmes forestiers plantés et aménagés
- Les paysages
- Les écosystèmes urbains et périurbains

CHAPITRE

2

Dynamiques des territoires : les changements de couverture et d'utilisation des terres

Alain Pavé, Denise Pumain, Claudine Schmidt-Lainé

1 ■ Définitions et enjeux

Les écosystèmes, les agrosystèmes et les systèmes fortement anthropisés des zones périurbaines et urbaines couvrent les surfaces continentales. Les zones littorales, elles aussi, sont constituées d'écosystèmes de plus en plus soumis à la pression anthropique (aménagement littoraux, urbanisation). Les systèmes continentaux et littoraux sont non seulement influencés par l'action anthropique locale, mais aussi par les grandes évolutions planétaires, notamment climatiques.

Les questions principales que posent ces systèmes sont les suivantes :

- Comment le jeu subtil entre décisions et actions anthropiques et les grandes évolutions au niveau planétaire modifie-t-il les territoires ?
- Quels états et changements doit-on et peut-on observer ? Existe-t-il des archives naturelles et humaines permettant d'estimer les évolutions passées, à l'échelle de l'histoire des sociétés humaines ?
- Quelles sont les parts respectives des dynamiques naturelles et des dynamiques sociales dans ces évolutions ? Peut-on les modéliser, les prévoir, à quelles échelles et avec quels objectifs ?
- Quels sont les dispositifs institutionnels dont dépend la gestion des territoires, et quelles sont leurs marges de manœuvre ?

1.1. Définitions : de quoi parle-t-on ?

1.1.1. Les territoires

Les territoires, au sens où nous l'entendons ici, sont des espaces géographiques, caractérisés par la nature et la répartition spatiale des systèmes qui les recouvrent, par exemple le type de végétation ou la densité de surface construite, et par leur localisation, ainsi que par les usages qu'en font les sociétés humaines (usages agricoles, usages récréatifs, espaces naturels protégés, usage résidentiel, usage industriel, réseaux de transport, etc.).

Cette notion se retrouve à plusieurs échelles : locale, régionale, nationale, continentale et planétaire. À ces différentes échelles correspondent, ou devraient correspondre, des niveaux d'organisation, aussi bien « naturels » que sociaux, et des niveaux de décision. Le concept de gouvernance vise à assurer une cohérence entre, d'une part, les diverses structures naturelles ou anthropisées constituant des territoires, leurs dimensions, les grandeurs caractéristiques des processus les faisant évoluer et, d'autre part, les organisations sociales impliquées dans la gestion de ces territoires, les niveaux auxquels interviennent ces organisations, les mécanismes de décision, leurs portées spatiales et temporelles et les techniques employées pour les mettre en œuvre.

Bien que réservée aux domaines terrestres, on peut envisager d'étendre la notion de territoire à certains espaces maritimes, par exemple aux zones littorales jusqu'à la limite du plateau continental.

1.1.2. Distinguer couverture et utilisation des terres

À une même couverture (*Land Cover*) peuvent correspondre des usages différents (*Land Use*). Par exemple, les systèmes forestiers peuvent être réservés à la production de bois ; ils peuvent aussi constituer des espaces de loisirs ; ils peuvent être des espaces protégés, réserves de biodiversité ou encore être mis en place pour constituer des puits de carbone. Ces usages peuvent être combinés : on parle alors de multi-usages.

Ainsi peut-on proposer les définitions suivantes :

- la couverture des terres est caractérisée par la nature de la végétation et des sols qui supportent cette végétation, plus généralement par le type d'écosystème concerné ;
- l'utilisation des terres est caractérisée par le type d'usage qu'en font les sociétés humaines.

Couverture et usage ne sont évidemment pas indépendants.

1.1.3. Dynamique de la couverture et des usages

La nature et l'évolution des écosystèmes et des agrosystèmes dépendent des conditions climatiques, géomorphologiques et édaphiques (qui se rapportent au sol). Ils sont aussi soumis à des facteurs sociaux, économiques, culturels, politiques, qui déterminent les usages et techniques, qui caractérisent les modes d'intervention. Prévoir les évolutions et les transitions demande donc de tenir compte non seulement des facteurs naturels, de leur variabilité et de leurs changements, mais aussi des déterminants socio-économiques et techniques qui les conditionnent.

Cela est aussi vrai pour les zones plus artificialisées, comme les zones urbaines ou périurbaines (concentration des activités industrielles, commerciales et de service, groupement de l'habitat), mais avec un effet d'ordre socio-économique et technique plus marqué que celui des facteurs naturels.

On pourrait dire aujourd'hui que les conditions biophysiques définissent les limites du « naturellement » possible (par exemple, en agriculture pour le choix des espèces à cultiver) ; l'état économique et le savoir technique déterminent les domaines de l'humainement possible ; les aspects sociaux et culturels délimitent l'espace du socialement acceptable. Une autre « contrainte » réside dans la configuration spatiale

actuelle, issue d'une longue évolution faite de microajustements très nombreux et interdépendants entre les conditions biophysiques et sociales et l'organisation de l'espace géographique qu'ont produit leurs interactions. Cette histoire conditionne en partie les futurs possibles. C'est dans ce contexte et dans son évolution que l'occupation des terres, que leur couverture et que leurs usages changent.

Ainsi les terres émergées et la zone littorale se présentent comme une mosaïque de systèmes, ayant une histoire et qui se situent à plusieurs échelles d'observation et de décision : de la parcelle au continent, en passant par la région¹. Du point de vue de leur gestion, la « parcelle » relève d'une décision locale, la région d'une série emboîtée de décisions (exploitation, entreprises, communes et groupes de communes, région administrative). Le continent, pour ce qui nous concerne, relève de décisions prises au niveau européen. Nous insistons sur le terme « décision » car, dans un monde fortement anthropisé, le type de couverture des terres et leur usage dépendent en fait de décisions prises à ces différents niveaux, sous tout ou partie des contraintes énoncées plus haut.

1.1.4. Quelle approche ?

Comme il a déjà été souligné dans le chapitre précédent, l'approche en termes de systèmes doit être privilégiée. Sans prétendre être exhaustif, elle se caractérise par :

- l'identification des processus pertinents et de leurs grandeurs caractéristiques (temps et espace), des niveaux d'organisation et de leurs emboîtements, des échelles d'observation et de modélisation, des problèmes d'agrégation² et de désagrégation², notamment des données ;
- la prise en compte des interactions entre des éléments de natures diverses : bioécologique et physicochimique, puis de leurs relations avec les composantes humaines, sociales et techniques ;
- l'étude et la modélisation de la dynamique de ces systèmes et de plus en plus l'intégration des dimensions spatiales et l'introduction de

1. Le concept de région est ambigu. Au sens des sciences de la nature, une région correspond à un ensemble géomorphologique et/ou bioclimatologique présentant une unité (exemples : bassin versant d'un grand fleuve, savanes des régions sèches tropicales, massif forestier). Une région, au sens administratif, correspond à une unité de gestion liée à la structure sociale et à l'activité humaine. Il n'y a pas forcément recouvrement entre régions « naturelles » et régions « administratives », ce qui pose des problèmes de « gouvernance » lorsque la gestion intègre des dimensions écologiques ou géomorphologiques. Enfin, au sens anglo-saxon (principalement américain), les régions sont plutôt supranationales et continentales, alors qu'elles sont plutôt infranationales en Europe. Suivant les disciplines, le langage scientifique utilise les différentes acceptions du mot.

2. Voir chapitre 5 « Échelles et changements d'échelles : problématiques et outils ».

l'hétérogénéité géographique, tant au niveau des données (données chrono et géoréférencées) que des modèles.

1.2. Les enjeux : pourquoi en parle-t-on ?

Les enjeux ont d'abord été liés à l'agriculture et à la production de biens, principalement alimentaires, puis à la gestion des ressources renouvelables (vivantes, comme les produits de la forêt, et non vivantes, comme l'eau). Il faut y ajouter, de tout temps, l'organisation de l'habitat des populations humaines, d'abord orienté en fonction de la production agricole, puis par celle des industries et des services. L'un des objectifs de l'aménagement des territoires était d'assurer les transports pour acheminer les biens. Ainsi, le développement puis la spécialisation de l'agriculture occidentale ont été fortement liés à la création de voies terrestres et fluviales fiables permettant de faire circuler les biens et de les orienter vers les marchés urbains. Ces enjeux sont toujours d'actualité, mais ont pris une plus grande dimension : de marchés régionaux et nationaux, on passe à des marchés internationaux, continentaux et mondiaux. En retour, ces extensions ne sont pas sans effets sur les politiques et stratégies agricoles, sur le choix des cultures et des élevages, et plus généralement sur le mode d'utilisation des terres.

La deuxième grande catégorie d'enjeux est environnementale. Les atteintes, supposées ou avérées, à l'environnement dues à l'action de l'homme, les variations et l'évolution des conditions naturelles qu'il ne faut pas sous-estimer³, auxquelles ces actions humaines contribuent de plus en plus, ont, dès les années 1960, amené à s'interroger sur l'occupation des sols, sur les couvertures associées et sur leurs effets environnementaux : contribution aux évolutions de gaz à effet de serre, érosion de la biodiversité, pollutions diverses d'origine agricole, etc., leurs effets sur la santé humaine et sur la structure et la dynamique des écosystèmes, sur les systèmes de production agricole.

Une troisième série d'enjeux, en interaction avec les précédents, concerne l'habitat. La transition urbaine, qui intervient depuis deux siècles dans les pays développés et depuis un demi-siècle dans les pays en développement, a profondément transformé un système de peuplement rural, fait de villages, petits, nombreux et dispersés, en un peuplement urbain, constitué de villes aux dimensions très contrastées, et beaucoup plus concentré. La diffusion des usages de l'automobile a entraîné au cours des cinquante dernières années en France un doublement des surfaces urbanisées et une multiplication par quatre de

3. Le Sahara n'était-il pas « vert », il y a 6 000 ans ? il faut également souligner qu'inversement, c'est en partie grâce aux données sur l'agriculture qu'Emmanuel Leroy Ladurie a reconstitué l'histoire du climat en France depuis l'an 1 000 (1983).

celles qui sont concernées par des flux quotidiens de fréquentation urbaine. La régulation de l'étalement urbain est devenue une préoccupation majeure (développement durable, qualité de la vie et de l'environnement urbains, maîtrise de la mobilité, échelles de gestion des territoires).

1.3. Les problèmes

Le problème général est de concevoir des méthodes et des outils pour la gestion, l'aménagement, l'ingénierie des territoires en intégrant toutes les dimensions, y compris biophysiques et écologiques⁴. L'une des difficultés majeures est l'hétérogénéité de la surface continentale et la grande diversité des milieux et des situations. Comment représenter cette diversité ? Comment la prendre en compte ? Quels sont les niveaux d'organisation pertinents, les processus et leurs grandeurs caractéristiques, les échelles d'observation et de modélisation correspondantes ? Quelles agrégations, ou désagrégations peut-on faire ? Quelles sont les limites des agrégats, c'est-à-dire des composantes homogénéisées des systèmes ainsi définis en fonction de la question posée ?

Outre ces questions scientifiques et méthodologiques : quels sont les objectifs de la gestion des territoires et leurs évolutions dans le temps ? Comment concevoir des outils adaptés, qu'ils soient techniques ou institutionnels ? Comment intervient la recherche scientifique dans ce type de problématique ?

2 ■ Aspects historiques : évolution des points de vue

Jusqu'à un passé récent, c'est-à-dire jusqu'aux années 1980-1990, les problématiques étaient principalement agricoles et forestières ; il s'agissait tout d'abord de référencer les cultures et d'évaluer les ressources forestières pour satisfaire les besoins des sociétés, dans un but principalement économique ou réglementaire (évaluation de la ressource, évaluation de la production, paiement des taxes, contrôle du respect des quotas, etc.).

Dans cette approche, les campagnes, les zones rurales et les milieux naturels sont déconnectés de la ville et du périurbain. *A contrario*, ne

4. En quelques sortes, ce sont les outils d'un « contrat naturel » (Michel Serres, 1990) ou plutôt d'un « contrat entre les hommes à propos de la nature ».

pourrait-on pas imaginer un continuum entre systèmes naturels, systèmes ruraux, systèmes périurbains et systèmes urbains ? La question du foncier est traitée à part, d'où une partie des problèmes rencontrés lors des opérations de remembrement, alors que leurs conséquences sur les exploitations agricoles sont importantes (rassemblement des terres pouvant mener à de grandes parcelles de monocultures). Simultanément, on assiste à une révolution technique (mécanisation, intrants chimiques et sélection variétale).

Les questions de relations entre les niveaux d'organisation et les échelles d'observation (qui font l'objet du chapitre 5 « Échelles et changements d'échelles : problématiques et outils ») sont peu traitées. Dans les meilleurs des cas, les données sont soit agrégées, soit moyennées, sans réelle référence spatiale. On ignore la variabilité locale aussi bien spatiale que temporelle (par exemple, la diversité des cultures et de leur évolution interannuelle). On prend mal en compte les pressions globales. L'aménagement du territoire est traité à part, même si ses objectifs sont liés au développement de l'activité économique, en particulier agricole. Bien qu'il existe une institution traitant de ce problème (en France, la Datar), l'évolution des territoires dépend aussi d'autres institutions nationales et supranationales⁵, et cet aspect de la question est souvent oublié. Enfin, et jusqu'à un passé récent, les aspects écologiques, et plus généralement environnementaux, sont ignorés (par exemple, le chapitre consacré à l'aménagement des territoires dans l'*Encyclopædia Universalis*, dans son édition de 1977, ne traite que des aspects géographiques et économiques). De fait, leur traduction institutionnelle est récente (le ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement est créé en 1997).

Curieusement, ce sont plus les programmes de recherche que les demandes des acteurs qui feront évoluer la situation, notamment les programmes nationaux ou internationaux. Par exemple, les programmes interdisciplinaires entre sciences de la nature et sciences sociales (notamment, le programme « Environnement, vie et sociétés » du CNRS) montrent que les conditions naturelles ne suffisent pas à expliquer les choix locaux et leurs conséquences. De leur côté, les programmes sur les changements globaux (principalement IGBP) montrent que les niveaux et les échelles sont étroitement liés entre eux et qu'on ne peut pas négliger les grandes évolutions planétaires. Enfin, les grandes interrogations sur la biodiversité et leur traduction en termes de gestion des écosystèmes et des agrosystèmes trouvent, elles aussi, leur origine dans la communauté scientifique.

5. Les effets de la politique agricole commune sur l'utilisation des terres sont, à court terme, sans commune mesure avec les évolutions naturelles.

3 ■ Les problématiques des changements globaux, « *Land use, land cover, land cover change* » : couvertures et utilisations des terres et leurs évolutions

3.1. L'origine : le programme IGBP (*International Biosphere-Geosphere Programme*)

Lancé au début des années 1980, ce grand programme, toujours très actuel, a pour ambition de mieux comprendre les évolutions naturelles à l'échelle planétaire. D'abord d'inspiration très physicochimique et lié à l'évolution du climat, dès la fin de cette décennie, il a inclus des dimensions écologiques, notamment avec la création du programme GCTE : *Global Change and Terrestrial Ecosystems*. Mais, d'inspiration principalement écologique, il traite plus de la couverture des terres (*land cover*) et de leur contribution aux grands cycles biogéochimiques, que de leurs usages (*land use*) et des conséquences de ces usages et de leur dynamique sur l'évolution même de cette couverture. C'est pour cette raison que, dès 1992, une initiative devait être prise, dans le cadre d'IGBP, qui aboutit à la création du programme LUCC (*Land Use land Cover Change*).

3.2. Le programme international *Land Use land Cover Change* (LUCC)⁶

Ce programme, dont la conception a donc démarré en 1992, ne verra sa formalisation qu'en 1995 et son aboutissement opérationnel qu'en 1997. Le nombre de projets labellisés est passé de 2, fin 1997 à 10, fin 1998, puis à 22 (1999) et à 30 en 2000. Il en compte aujourd'hui une quarantaine. Ce programme travaille essentiellement sur appels d'offres. De fait, parti d'une approche principalement écologique, il est apparu très vite que les aspects socio-économiques n'étaient pris en compte que trop sommairement, c'est pourquoi, issu d'une initiative IGBP, il est devenu un programme commun IGBP-IHDP (*International Human Dimension Programme*). C'est la prise de conscience de l'importance du « facteur humain » sur l'évolution des écosystèmes qui en est à l'origine. Elle était déjà manifeste dans certaines initiatives nationales et bien affirmée dans un dossier de *Science* (« *Human dominated Ecosystems* ») en 1997, de la part des écologues eux-mêmes.

6. www.geo.ucl.ac.be/LUCC/

Par ailleurs, la prise en compte de la structure de l'espace géographique est apparue de plus en plus nécessaire. Déjà d'actualité chez les écologues dès les années 1970, les questions de la diversité des milieux et de leur complexité structurelle, l'introduction du paysage comme système écologique « hétérogène », conduisent de plus en plus à la prise en considération des dimensions spatiales et de leurs topologies. Elle est incontournable pour aborder les problèmes de la couverture, de l'utilisation des terres et de leur évolution.

Sous le double mouvement des sciences sociales et des sciences écologiques, les points de vue de LUCC ont singulièrement évolué, comme le soulignent Lambin et Geist dans un récent numéro des *Newsletters* d'IGBP (tableau 2.1.). On notera tout particulièrement l'approche historique (fig. 2.1.) et la relativisation de la variable démographique dans l'évolution des écosystèmes soumis à pression humaine, longtemps considérée comme primordiale⁷.

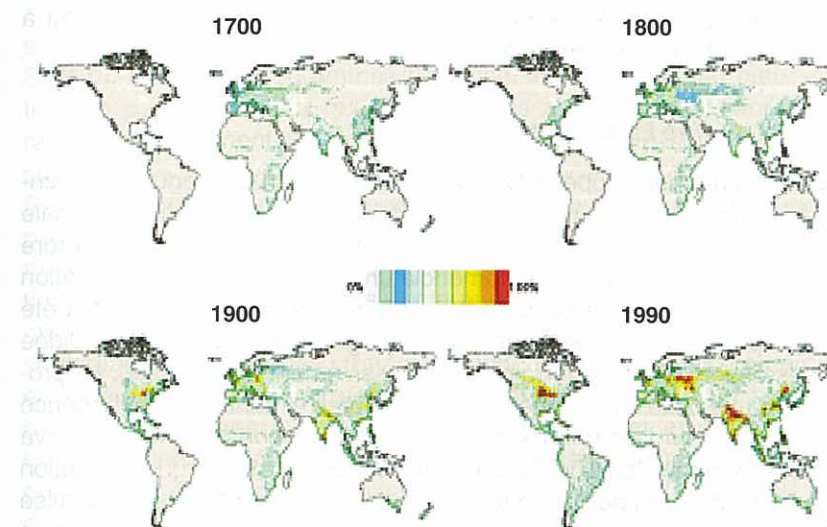
Faisant une large part à l'approche *bottom-up*, ce programme est faiblement structuré *a priori*. À partir des réponses à ses appels d'offres, on peut trouver une structure approximative, *a posteriori*, en répartissant les projets actuels de LUCC dans les catégories suivantes :

- changements climatiques : impacts et réponses (sociétés et écosystèmes), conséquences sur la couverture et l'utilisation des terres ;
- études intégrées (écologiques et socio-économiques) et modélisation au niveau régional ;
- surveillance et suivi, notamment par télédétection spatiale ;
- biogéochimie : flux de carbone en fonction de la couverture et de l'utilisation des terres.

7. Ainsi, le morcellement des exploitations agricoles, en France entre 1520 et 1710, est-il vu comme la conséquence de l'évolution démographique du monde rural (Grenier, 1988). Cependant, à partir de 1750, les liens démographie-agriculture (si ce n'est qu'il y a forcément un lien économique), du point de vue de l'utilisation des terres (types de culture), semblent relever plus des innovations techniques progressives que de la démographie elle-même (Grenier, 1988). Dans un article récent, Geist et Lambin (2002), montrent qu'il faut encore plus relativiser l'hypothèse démographique dans les problèmes de déforestation tropicale.

Tableau 2.1. Évolution des points de vue dans la compréhension des changements de couverture et d'utilisation des terres (d'après Lambin E.F., Geist H.J., 2001).

Avant 1997	Aujourd'hui
Conversion, altération de la couverture des terres.	Modification de la couverture des terres généralement dominant si on considère le passé récent.
Focalisation principale sur les forêts tropicales.	Tous les types de couverture, incluant les prairies, les forêts ouvertes, les zones périurbaines, les zones humides.
Territoires supposés à l'état naturel jusqu'à un passé récent.	Paysages modifiés par l'homme depuis des millénaires.
Changements permanents, réguliers.	Trajectoires complexes et réversibles du changement ; la couverture des terres est en permanence dans un état transitoire (instationnaire).
Homogénéité spatiale.	Grande hétérogénéité spatiale ; importante fragmentation des paysages.
Conséquence de la croissance démographique.	Aussi dû à la réponse des sociétés aux évolutions économiques et politiques, avec des événements biophysiques et socio-économiques déclenchants.
Point de vue principalement local.	Prise en compte des influences des centres urbains plus ou moins lointains, amplification ou atténuation due à la globalisation, avec de fortes interactions locales.
Les évolutions sont surtout des conséquences de l'expansion de l'agriculture.	Intensification et diversification sont des réponses communes aux pressions et aux opportunités.
Impacts sur le cycle du carbone.	Impacts sur la santé humaine, sur la biodiversité, sur l'albedo, sur le cycle de l'eau, sur les émissions et rétentions de carbone, de NO _x , etc.
Les impacts dépendent de l'amplitude des changements biophysiques.	Les impacts dépendent principalement de la vulnérabilité des populations et des zones naturelles, rurales ou urbanisées.
Partout.	Concentration spatiale sur les « points chauds ».

Figure 2.1. Évolution des terres agricoles entre le XVII^e et la fin du XX^e siècle au niveau mondial (Goldewijk, 2000 ; Ramankutty *et al.*, 2001).

3.3. Les programmes d'observation de la Terre et de représentation de la couverture des terres

Ces programmes utilisent largement les moyens satellitaires d'observation de la Terre et ont, en complément, une activité scientifique et méthodologique. Parmi ceux-ci, on peut en retenir trois : *Global terrestrial observation system* (GTOS), *Corine Land Cover*, *Global monitoring for environment and security* (GMES).

La confrontation entre ces observations (qui sont toujours géoréférencées), et celles qui peuvent être faites directement au niveau du terrain (qui ne le sont pas toujours, surtout aujourd'hui) est un problème essentiel. Il est abordé aux paragraphes 4.2 et 4.3, ainsi que dans l'exemple tiré du rapport Inra sur le stockage du carbone.

3.3.1. Global terrestrial observation system (GTOS)⁸

Ce programme a pour objectif de faciliter l'accès à une information fiable sur les écosystèmes terrestres de façon que les chercheurs et les décideurs puissent détecter et gérer les changements globaux et régionaux. Un des projets concerne la dynamique de la couverture végétale (caractéristiques de la couverture, surveillance des feux, processus bio-

8. Les institutions internationales soutenant ce programme sont : la FAO, l'Unesco, l'Icsu, l'Unep, et le WMO.

physiques). Centré au départ sur le couvert forestier, il a été élargi à d'autres types de couverture végétale.

3.3.2. Corine Land Cover

Le programme européen Corine, lancé en 1985, a produit un inventaire harmonisé de la couverture des terres, avec une résolution minimale d'environ 25 hectares, qui permet de travailler à des échelles de l'ordre du 1/100 000^e. Il propose une nomenclature en 44 catégories d'utilisation du sol, qui peut être agrégée en 15 ou 5 postes. La classification a été réalisée par interprétation visuelle des images Landsat et Spot, validée par des observations de terrain et progressivement automatisée. La production d'une mise à jour datée de 2000, pilotée et contrôlée par l'Agence européenne pour l'environnement, à partir des images de Landsat 7, va permettre à partir de 2004 d'étudier de manière systématique l'évolution de la couverture du sol, et cette information est essentielle pour la mise au point de nombreux modèles. En France, les données seront calées sur celles de la base de données cartographique de l'IGN en 2002 (les données de Corine étant utilisées pour mettre à jour la couche « utilisation du sol » de cette base), ce qui conduira à la constitution du référentiel à grande échelle que la France doit produire d'ici à 2004 pour remplir ses obligations dans le cadre de la politique agricole commune.

Les données de Corine sont utilisées principalement par les services opérationnels de l'État et pour un tiers par la recherche publique, souvent en vue d'une cartographie. Pour la modélisation, elles conviennent bien aux échelles moyennes et sont alors employées couplées à d'autres données dans des systèmes d'information géographique.

Pour des études plus fines ainsi que pour la mesure détaillée du changement en milieu agricole, forestier ou urbain, de plus hautes résolutions sont nécessaires (par exemple, données Ikonos à 1 mètre ou données Spot 5 à 2,5 mètres).

3.3.3. Global monitoring for environment and security (GMES)

Cette initiative européenne, issue du *Manifesto di Baveno* de 1998 et organisée à partir de 1999, associait à l'origine les grandes agences spatiales (Cnes, Eumestat, EESA, Eurospace, EARSC, DLR...). Rejointe par la direction de la Recherche et celle de l'Environnement, elle a désormais pour objectif d'établir, en Europe, une entité identifiable à laquelle les décideurs et les utilisateurs des technologies d'information sur la Terre (par exemple les satellites d'observation) puissent s'adresser. L'une des idées maîtresses est d'assurer l'indépendance de l'Europe en moyens d'observation de la terre. On trouvera au chapitre 6 « Infrastructures et moyens de mesure », une analyse des points forts et des limites de l'initiative GMES.

© Lavoisier - La photocopie non autorisée est un délit

Bien qu'étant conçu largement avant cette initiative, le satellite Envisat sera l'un des éléments de cette technologie (ainsi qu'ERS2 et Spot 5). Parmi les programmes de recherche soutenus par cette initiative, on peut noter ceux qui sont destinés à améliorer la fiabilité et la rapidité du traitement des données (programme de l'ESA) et ceux explicitement liés à l'environnement et au développement durable dans les 5^e et 6^e PCRD. Dans ce dernier, il s'agit notamment de produire une prévision et une modélisation opérationnelles des liens entre changements climatiques et évolutions des écosystèmes, agricoles et forestiers, en incluant des aspects sociaux et économiques. Le développement de systèmes d'observation, cohérents et harmonisés, vise non seulement à élaborer des stratégies à long terme mais aussi à gérer les événements catastrophiques. Il s'agit enfin de mettre au point des bases de données européennes et de contribuer aux grands programmes internationaux. Toutefois, les avancées permises par ce programme ne seront pas mobilisables par les modélisateurs avant la fin du 6^e PCRD, qui assure la rencontre entre fournisseurs et utilisateurs de données pour collaborer au développement de nouveaux produits.



Figure 2.2. Lancement d'Envisat, une des pièces maîtresses de GMES, le 28 février 2002 à 22 h 07 mn 59 s, heure locale de Kourou (lanceur Ariane 5, photo Cnes). Ce satellite a été placé sur une orbite proche de celle d'ERS 2, ce qui permet de coupler les observations optiques et radar.

© Lavoisier - La photocopie non autorisée est un délit

4 ■ Les problèmes méthodologiques : observations, représentations, modélisations et gestion

4.1. Les éléments du problème

La question centrale est celle de la diversité, de sa description et de sa gestion. L'occupation et l'exploitation des territoires se sont traduites, au cours du temps, par une différenciation et une organisation des paysages. De systèmes assez homogènes, sur de grands espaces, on est passé à des mosaïques de petits écosystèmes. Or, comme nous l'avons déjà souligné, les niveaux de décision et de gestion se situent à des échelles différentes (par exemple, du niveau local de l'exploitation agricole au niveau du marché mondial pour l'agriculture). Chacun de ces niveaux doit disposer d'informations pertinentes pour ses décisions et, si besoin, pouvoir « zoomer » jusqu'au niveau local, ou au contraire se replacer dans une vision globale. Comment agréger, ou, au contraire, désagréger les informations ?

C'est donc typiquement dans cette problématique de couverture et d'utilisation des terres que se posent les problèmes d'échelles et de niveaux d'organisation développés dans le chapitre 5 « Échelles et changement d'échelles : problématiques et outils ».

4.2. Observations, acquisition de données

Chacune de ces échelles d'observation a son importance, même si actuellement l'observation spatiale est privilégiée dans les investissements. Le niveau terrain (local) est assez bien développé, ne serait-ce que parce que l'on a eu besoin d'une « validation terrain » pour interpréter les observations spatiales (on notera quand même que l'exhaustivité n'étant pas possible, se posent des problèmes d'échantillonnage qui ont conduit, ces 10 dernières années au développement de la géostatistique). Les moyens aériens (mésosécherelle) sont négligés, notamment en Europe, alors que fréquemment leur besoin se fait sentir⁹. L'investissement en moyens spatiaux d'observation de la terre est très important. Bien que ceux-ci soient susceptibles de travailler à diverses échelles (du m², d'Ikonoss, au km², de NOAA), il semble aujourd'hui nécessaire de compléter les échelles d'observation et les moyens correspondants (voir par exemple, Lévêque *et al.*, 2001 ou Pavé et Laurent, 2002).

9. Pour ne prendre qu'un exemple, la cartographie des zones forestières n'est actuellement pas précise (on ne voit pas le sol et la canopée « filtre » le relief). Très récemment, une méthode de télémétrie laser a été mise au point. Mais elle n'est utilisable qu'en avion ou en hélicoptère.

Tableau 2.2. Les satellites européens (ou à large participation européenne) d'observation de la Terre (les astérisques indiquent les engins qui émargent au titre des très grands équipements scientifiques).

Nom du satellite	Fonctions du satellite
Topex/Poseidon	Mesure du niveau des océans par altimétrie radar (lancé le 10 août 1992).
Proteus/Jason*	Série de petits satellites, utilisant la plate-forme multi-missions Proteus, pour l'observation topographique des océans (le lancement de Jason-1 a été effectué le 7 décembre 2001).
Envisat*	Série de satellites d'observation de l'atmosphère et de la surface de la Terre (le lancement d'Envisat-1 a été effectué par le lanceur Ariane 5, le 1 ^{er} mars 2002, GTU).
ERS1 et ERS2*	Surveillance permanente et par tous les temps des océans, des terres émergées et des glaces polaires au moyen de techniques radar (lancés en 1991 et 1995 respectivement).
Picasso-Cena*	Climatologie étendue des nuages et des aérosols (lancement prévu en 2003).
Spot	Série de satellites d'observation de la Terre à visée commerciale. Spot 5 a été lancé le 5 mai 2002. Spot 4 est encore en service.
MSG*	Série de 3 satellites météorologiques en orbite polaire (premier lancement prévu été 2002).
Metop*	Série de satellites météorologiques en orbite polaire (premier lancement prévu en 2003).

Enfin, pour mieux analyser, pour mieux intégrer les éléments du problème, il s'avère de plus en plus nécessaire de compléter ces données d'observation biophysiques, par des données de terrain (et ne pas se contenter de la « vérité terrain » pour valider l'analyse spectrale) sur la nature des écosystèmes, sur les conditions socio-économiques, voire historiques, locales. À chaque « pixel » ou ensemble de pixels des attributs doivent être associés permettant de récupérer des données de ces types (voir par exemple, Liverman *et al.*, 2000).

4.3. Organisation des données et représentations : bases de données géoréférencées et systèmes d'informations géographiques (SIG)

Comme on vient de le voir, le problème central est de réunir des données d'origines diverses, sur une base principale constituée par des informations issues de la télédétection spatiale et aérienne. Une première phase consiste à interpréter ces images et à les mettre en relation avec des données de terrain. Ainsi, on a mis en évidence les relations entre les images issues de la télédétection et la mesure de variables associées à des activités humaines, en regardant les conséquences de divers processus sociaux, économiques et démographiques. Par exemple, les observations à distance de la couverture des terres peuvent révéler la signature de l'extension des domaines agricoles, de l'urbanisation, du développement des réseaux de transport ; l'observation de la végétation peut être mise en relation avec les effets de la fertilisation, de l'irrigation, et d'autres pratiques agricoles ; l'observation de nouvelles constructions peut être reliée aux effets des pratiques locales, des modifications de la taxe foncière. Les données de la télédétection ont quelquefois prouvé qu'elles étaient une excellente méthode pour identifier les sites archéologiques et pour dégager des indications sur leur contexte géographique dans un but d'interprétation des déterminants du choix de ces sites.

Néanmoins, dans un objectif de détection des processus naturels et sociaux, l'imagerie satellitaire ne constitue qu'un des éléments de systèmes d'information plus généraux rassemblant des données d'origines très différentes, notamment de « terrain ». (Liverman *et al.*, op. cit.), soigneusement validées et régulièrement actualisées. La prévision de l'évolution des territoires et les processus de décision, qui président à leur gestion et à leur ingénierie, doivent d'appuyer sur de tels systèmes d'information auxquels sont couplés des modèles de la dynamique de ces territoires. En quelque sorte, dans le même ordre d'idée que celle développée dans le chapitre 5, « Échelles et changements d'échelles : problématiques et outils » : des SIG « intelligents ». Nous n'en sommes pas là, mais on peut néanmoins retenir quelques projets actuels.

Ainsi, dans un rapport récent, Di Gregorio et Jansen (2000) présentent la critique de ce qui existe et un projet de développement d'un LUCCS (*Land Use and Cover Change System*) pouvant être utile à une grande variété d'utilisateurs (multi-usages) et permettant de faire une classification générale à partir des données. Ils restent néanmoins dans une logique du « presque tout satellitaire ».

Pour ce qui existe, les auteurs émettent les critiques suivantes :

- la définition couvert végétal suivant l'Unesco est centrée sur la végétation naturelle, les zones agricoles sont ignorées ; c'est une vision naturaliste ;

- d'autres outils sont trop orientés zones cultivées (vision agronomique) ;

- des problèmes méthodologiques ont été détectés. Par exemple, Corine : problèmes de consistance dans la classification (Di Gregorio, Jansen, op. cit.).

Par ailleurs, on retiendra les difficultés de couplage des sources européennes couvrant le territoire et relatives à l'environnement d'une part (Corine *Land Cover*), celles relatives aux données socio-économiques (base Sire d'Eurostat) et celles permettant d'en donner des représentations cartographiques ou dans des systèmes d'information géographique (base de données Sabe, produite et commercialisée par la structure Eurogeographics, appelée Megrin jusqu'en 2001, qui est une structure de coopération des IGN européens). Bien que les systèmes et les références de projection soient identiques, il existe un décalage géométrique entre le fond Megrin et l'image Corine (pouvant aller jusqu'à 1 km). Il s'agit d'une déformation (et non d'une simple translation), qu'il faut corriger avant tout rapprochement des données d'utilisation du sol et des informations socio-économiques. En outre, les dictionnaires de correspondance entre le fond Megrin et la base Sire ne sont pas exempts d'erreurs ou d'énigmes. Enfin, l'emploi des images de satellite type Landsat ou Spot avec résolution plus fine dans des environnements intra-urbains est en développement (Dureau F. et Weber C., 1995).

Dans l'état actuel, il semble manquer les éléments suivants :

- une véritable mesure du degré d'**artificialisation**¹⁰ des milieux et des systèmes territoriaux. Ce degré d'artificialisation pourrait correspondre à une estimation de ce qui est laissé au fonctionnement « naturel ». Ainsi, les surfaces construites, urbanisées, sont au plus haut degré d'artificialisation (avec une gradation urbain, périurbain) ; un agrosystème est un écosystème construit et contrôlé qui relève en partie d'un fonctionnement autonome et donc serait à un degré moindre d'artificialisation. Ce degré serait plutôt faible pour les forêts plantées depuis plusieurs siècles (même si elles sont entretenues), le degré quasi nul serait réservé aux forêts naturelles et autres zones peu perturbées (forêts tropicales, forêts boréales, zones désertiques, systèmes insulaires non habités) ;

- dans le même ordre d'idée, une mesure et un suivi de l'urbanisation. Ainsi, les catégories d'utilisation du sol identifiées par Corine *Land Cover* comme « sols artificialisés » correspondent à l'emprise au sol des zones bâties, et donc, lorsqu'elles sont couplées avec les données administratives, donnent une mesure de la partie construite des com-

10. Une estimation récente de l'évolution des zones artificialisées, urbaines et périurbaines, montre que 30 000 à 40 000 ha sont consommés par an aux dépens des terres agricoles (Guigou, 2002).

munes regroupées dans les agglomérations urbaines. On sait que les terrains artificialisés identifiés dans Corine Land Cover ne correspondent pas exactement aux espaces « réellement » bâtis. La résolution minimale des images satellites d'origine et la taille du pixel de base sont une source d'incertitude qui n'a pas encore été évaluée de manière systématique. En dépit de ces approximations inhérentes à la source (liées à sa résolution, mais aussi à la marge d'erreur des classifications) on estime à 2,4 % du territoire cette emprise au sol du bâti urbain des agglomérations françaises, alors que les superficies des communes englobées par l'Insee dans les unités urbaines représentent 16,4 % du territoire (Guérois, 2002). Les corrélations avec la taille démographique des villes, les comparaisons de l'extension des zones bâties avec celles des agglomérations et des aires urbaines (définies par l'Insee à partir des flux domicile-travail quotidiens autour d'une ville) ainsi que les mesures de densité de population, brutes et nettes, mettent en évidence des variations dans les types d'occupation des sols urbains et l'intensité des pressions potentielles sur l'environnement. Le couplage des sources permet donc une mesure plus précise, et, dans le futur, un suivi de l'intensité des pressions sur l'environnement liées aux extensions spatiales des villes. En particulier, la question de l'évolution vers des formes urbaines plus ou moins compactes est posée, dans la perspective des politiques de développement durable ;

- une description de la dynamique de territoires alors qu'actuellement elle est en général statique (pas de représentation des « changements » : successions végétales, rotation des cultures, évolution des aménagements, etc.);

- l'introduction de modèles dynamique : elle est souvent évoquée, mais les réalisations concrètes sont encore limitées et peu prospectives (exemple : études de scénarios en fonction d'hypothèses différentes et de leurs conséquences);

- une meilleure introduction des aspects fonctionnels, notamment démographiques (par exemple des peuplements végétaux), et prise en compte de la contribution aux cycles biogéochimiques. Cela est évidemment essentiel pour élaborer des modèles.

Nous retrouverons quelques-unes de ces difficultés au paragraphe 4.6, où sera présentée, à titre d'exemple, l'étude qui vient d'être faite sur le stockage du carbone dans les sols.

4.4. Les problèmes d'échelles, agrégation et désagrégation des données

Les concepts fondamentaux sont présentés dans le chapitre 5 « Échelles et changements d'échelles : problématiques et outils ». Les problématiques *Land use - Land cover* demandent évidemment d'apporter des solutions méthodologiques et techniques, comme nous

l'avons déjà souligné. En outre, il y a nécessité, pour des raisons de « gouvernance » et par des opérations d'agrégation ou de désagrégation, de mettre en concordance les échelles et niveaux d'organisation des systèmes naturels, sociaux et de gestion.

On peut souligner, au passage, la difficulté que présentent les structures linéaires ou monodimensionnelles (voies de communications, réseau de rivières, etc.). Ces difficultés peuvent avoir des répercussions dans le cadre réglementaire : comment évaluer l'état d'un système dont la définition dépend de l'échelle d'appréhension ? On voit que, dans de nombreux cas, la question des échelles requiert une analyse préalable des objets décrits et des fonctions associées à ces objets, de manière à les rendre indépendantes de l'échelle adoptée.

4.5. La modélisation

La construction de modèles d'évolution de composantes de notre environnement, donc utiles pour approcher l'évolution des territoires n'est pas une démarche nouvelle, elle est en pleine expansion (Schmidt-Lainé et Pavé, 2002).

4.5.1. Quelques tendances actuelles

Les enjeux d'une modélisation appuyée sur des données fiables, mesures de la couverture terrestre, sont très importants. Par exemple, l'évolution de l'extension des forêts tropicales n'est connue qu'à 1 million de km² près, et, selon que l'on prend en considération les estimations produites par la FAO ou par la télédétection dans le cadre du programme LULC, la notion de « puits de carbone » est validée ou non. Dans un autre registre, les observations détaillées de l'évolution des forêts tropicales (programme Trees) montrent que l'importance des changements économiques et techniques serait plus forte que celle de la croissance démographique dans la déforestation (Achard *et al.*), ce qui évidemment modifie totalement l'orientation des politiques à envisager.

L'emploi des données d'utilisation du sol et la tendance à spatialiser les modèles paraissent aller de pair avec l'introduction de dimensions sociales dans la modélisation : ainsi, les chercheurs du réseau européen sur le carbone emploient des données atmosphériques ou des mesures au sol ; ils modélisent des flux « naturels », mais ne tiennent pas compte de la couverture et de ses variations.

Parmi les modèles météorologiques, on peut citer le modèle Arpège de circulation générale pour la Terre entière, qui fonctionne dans une maille de 100 km, pour des prévisions à 10 ans, et qui évalue l'effet des transformations de la surface sur le climat (par exemple il comporte des scénarios de déforestation). Ce modèle global, couplé à d'autres sur

une aire limitée, est celui qui permet des prévisions « grand public » du temps pour des durées de 1 à 5 jours (la maille est alors de 10 à 30 km). En sont dérivés des modèles comme Isba (Interface sol biosphère atmosphère) qui fonctionne à plusieurs échelles (1 km² ou moins) et un modèle hydrologique, de maillage variable selon la complexité topographique, qui a permis par exemple de reconstituer avec une précision satisfaisante les variations de débit de la Saône et de la Garonne (à partir d'informations sur le climat et sur le sol et la végétation). À noter ici qu'un modèle « physique » peut remplacer le modèle classique des relations entre précipitations et débit (modèle réalisé par Météo-France et l'École des mines).

À l'échelle des villes, c'est le couplage entre les données climatiques et celles de la base de données Topo de l'IGN qui permet la modélisation des microclimats urbains. Toutefois, des interrogations plus complexes sont à développer pour comprendre non seulement en quoi le dessin d'une ville influence le climat local, mais encore comment il faudrait construire les villes pour améliorer la qualité de l'air, à différentes échelles (celles de la région, de la ville, du quartier). L'effet des différentes formes de la végétation sur la pollution en ville est loin d'être connu (Mestayer, 1998). La modélisation de ces relations passe aussi par une évaluation des effets de la localisation des stations de mesure, particulièrement sensible en milieu urbain.

4.5.2. Des progrès à réaliser

Actuellement, le problème, dont certains aspects ont déjà été évoqués précédemment, consiste à mieux intégrer l'ensemble : données, modèles, représentations spatiales et temporelles. Ainsi, un SIG « intelligent » et « ouvert » (§ 5) permettrait de prendre en compte des données de natures et de définitions différentes, puis d'associer des modèles dynamiques de divers processus, par exemple de processus « naturels », bioécologiques et physicochimiques, et de processus socio-économiques, ces modèles pouvant être écrits dans des formalismes différents (Schmidt-Lainé et Pavé, op. cit.).

4.6. Un exemple de problème *Land use - Land cover* : le stockage du carbone dans les sols

Les difficultés et les problèmes méthodologiques qui viennent d'être évoqués interviendront chaque fois qu'on voudra répondre à une question concernant les sols et leur couverture végétale. Ce point sera illustré à partir de quelques leçons qui peuvent être tirées du rapport établi par l'Inra : « Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? » (Octobre 2002).

Ce rapport répond à une question précise des pouvoirs publics : dans le cadre du protocole de Kyoto, que peut-on faire en France en matière de stockage, sur quelles quantités annuelles peut-on compter, et comment vérifier les résultats obtenus ?

On ne cherchera pas à rendre compte ici des conclusions auxquelles aboutit le rapport, mais on s'intéressera à la méthodologie adoptée par les chercheurs de l'Inra, ainsi qu'aux outils utilisés (et parfois à l'absence d'outils). On a la chance, en effet, de disposer d'un texte qui fait le point sur ce qui est possible aujourd'hui en matière d'observatoires de mesures, de bases de données, et de modélisation.

4.6.1. Méthodes et observatoires de mesures

La vérification des quantités de carbone stockées dans les sols (qui est complémentaire de l'analyse des flux de CO₂ à laquelle le GIEC consacre beaucoup d'efforts) pourra se faire dans le cadre du « Réseau de mesures de la qualité des sols » (RMQS) qui se met en place en France (2100 placettes, selon une maille de 16 × 16 km). Il s'agira de suivre l'évolution des sols sur plusieurs dizaines d'années. Les auteurs du rapport Inra se sont livrés à une analyse par simulation de ce réseau, pour savoir à quelle échelle, en espace et en temps, les changements dans le stock de carbone pourraient être détectés. On trouve donc évoqués à cette occasion tous les problèmes que l'on retrouvera aux chapitres 5 « Échelles et changements d'échelles : problématiques et outils » et 6 « Infrastructures et moyens de mesure » : changements d'échelle et qualité du modèle de maille, utilisation de la modélisation pour tirer parti des corrélations spatiotemporelles et optimiser les réseaux d'observation.

4.6.2. Données disponibles

Le rapport présente un tableau des sources de données disponibles, tableau que nous reproduisons ci-dessous.

Ce tableau confirme le bien-fondé de plusieurs des affirmations présentées dans ce chapitre, ainsi qu'au chapitre 6 « Infrastructures et moyens de mesure ». Il montre en effet :

- l'obligation de faire appel à des données d'origines différentes : données aériennes et spatiales, inventaires sur le terrain, enquêtes administratives diverses. Certaines de ces données sont géoréférencées, d'autres ne le sont pas ;
- l'obligation d'effectuer un travail très important de raccordement des différentes informations, de confrontation entre ce qui est géoréférencé et ce qui ne l'est pas. Ce travail est très difficile (voire impossible) à faire pour les petites échelles. Il devient plus satisfaisant au niveau national ;
- l'origine « administrative » très diverse des données.

Tableau 2.3. Données utilisables pour le suivi de l'occupation des sols et des pratiques.

Opération	Recensement	Télé-détection	Photographies aériennes	Inventaires sur le terrain	Enquête chez agriculteurs	Déclarations et contrôles	des agriculteurs
Type de données	RGA Utilisation du territoire agricole des exploitations	Corine Land Cover Occupation du territoire	Inventaire forestier national (IFN) Occupation du sol, pratiques sylvicoles	Enquête Teruti Occupation du sol	Enquête Scees Pratiques culturales pour 10 productions (dont prairie tempo.) et jachère	Pour primes PAC Utilisation des terres Scop et/ou surf. fourragères uniquement	Dossier CTE et suivi Cultures et pratiques sur 5 ans pour les parcelles sous contrat
Nombre/nature des classes	Par culture	44 postes, dont 12 agricoles	Peu de postes pour le hors forêts	Par culture	Pour 10 cultures + jachère	Par culture	Par culture
Fréquences Dates	Tous les 10 ans Le dernier en 2000	10 ans Fait en 1992	Tous les 10 ans environ	Annuelle	Tous les 4/5 ans Le premier en 2001 Grandes cultures en 1994	Annuelle	En fonction des mesures choisies
Échelle d'acquisition Résolution	À l'exploitation	30 x 30 m	Photographies aériennes + placettes échantillons	1 point/100 ha (= 550 000 points) échantillon constant (sur un pas de temps de 10 ans)	Sous-échantillon des points de sondage de Teruti	À la parcelle, à l'exploitation	Parcelles déclarées d'une exploitation
Agrégation information disponible	À la commune (biais : localisation au siège de l'exploitation)	250 x 250 m nombreux pixels mixtes	À la petite région forestière. Localisation des données possible	À la petite région agricole. Localisation des données possible	Non connu actuellement (dépeuplement en cours)	À la commune (biais : uniquement les « déclarants »)	Enregistrements stockés chez les agriculteurs → accès délicat
Géo-référencement	Exhaustif	Exhaustif	Exhaustif	Uniquement sur échantillon	Non	Non	Uniquement sur déclarations CTE
Matrice de transition	Non	Oui pour les grands types d'usages	Oui pour les grands types d'usages	Oui pour tous usages	Oui	Reconstitution des successions éventuellement possible	Oui pour tous usages et pratiques

© Lavoisier - La photocopie non autorisée est un délit

De ces trois points, c'est le second qui pose le plus de problèmes, et qui entraîne un énorme travail chaque fois qu'on veut répondre à une question précise. C'est sur ce point que des efforts seront faits au cours des prochaines années. Ce qui entraînera certainement une réduction du nombre des colonnes du tableau 2.3.

4.6.3. Les modèles

Le rapport cite quelques modèles locaux (à l'échelle de l'exploitation), comme le modèle danois Fasset.

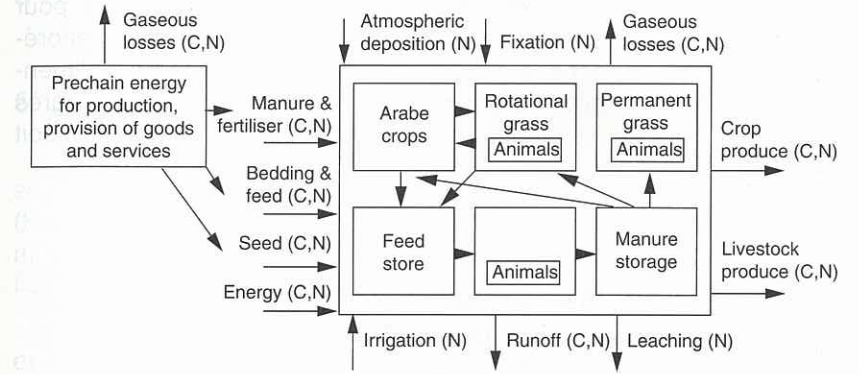


Figure 2.3. Représentation des principaux flux de carbone et d'azote dans une ferme de polyculture-élevage par le modèle Fasset (*Farm Assesment Tool*, Joergen Olesen et Nicholas Hutchings, Dias, Foulum Research Centre, non publié); in : expertise Inra « Stocker du carbone dans les sols agricoles ? ».

Le rapport note alors :

« Un tel outil n'ayant pas été développé en France à ce jour, il n'est pas possible d'évaluer de manière quantitative les conséquences de changement de pratiques agricoles sur le bilan de carbone (ou de gaz à effet de serre) des exploitations. Il convient donc de souligner un important besoin de recherches et d'intégration des connaissances dans ce domaine ».

À l'échelle de la nation ou du continent, le rapport évoque les modèles américains Fasom, Greet, et Epic, et présente un effort du même type concernant l'Europe. Les données nécessaires à cette modélisation correspondent aux dernières colonnes du tableau 2.3. Elles ne permettent pas de croiser complètement information économique et information géoréférencée : les résultats sont donc présentés

© Lavoisier - La photocopie non autorisée est un délit

suivant des catégories purement statistico-économiques. On voit ainsi que l'aspect spatialisé du problème est laissé de côté, et que tout une partie de l'analyse ne peut pas être faite. En particulier, les opérations d'agrégation et de désagrégation des résultats, sur lesquelles insiste le chapitre 5 « Échelles et changements d'échelles : problématiques et outils », restent impossibles.

Même si cet examen reste trop rapide, il permet de proposer quelques conclusions, qui sont bien dans la ligne de ce qu'indique le reste de ce chapitre. Le sujet *Land use - Land cover* est en pleine évolution, et les trois familles d'outils progressent parallèlement. Ce parallélisme est nécessaire : tant que les méthodes d'observation et de mesure au sol n'ont pas bénéficié des investissements nécessaires, les observations aériennes ou spatiales restent insuffisantes, à elles seules, pour la majorité des études. Tant que le raccordement entre ce qui est géoréférencé et ce qui ne l'est pas, n'a pas eu lieu, il est impossible d'alimenter des modèles complets, tirant parti de la spatialisation. Le progrès existe mais, pour qu'il produise ses meilleurs résultats, il faut qu'il soit général.

5 ■ De l'analyse à l'action : de *Land use - Land cover* à « land planning » ? Quelques enjeux majeurs

Si l'on revient à la problématique exposée en introduction de ce rapport, on constate qu'il s'agit non seulement d'observer, de comprendre et de modéliser, mais aussi de promouvoir une utilisation « opérationnelle » de ces connaissances.

Parmi les différentes questions qui vont constituer des enjeux économiques et sociaux très importants, trois se détachent particulièrement. Ce sont :

- le stockage et le déstockage de carbone dans les sols et dans la couverture végétale, qui viennent d'être discutés au paragraphe 4.6 ;
- l'utilisation de l'espace, dans les zones où la pression anthropique devra être gérée : zones côtières, zones urbaines et périurbaines ;
- l'intégration des données, des connaissances et des modèles. À ce propos, on retiendra les tentatives d'évaluations écologiques intégrées (IEA : *Integrated Ecological Assessments*, voir Bourgeron *et al.*, 2001).

Des systèmes d'information géographiques urbains sont mis en place dans les communautés d'agglomérations, avec une description fine des usages du sol, issue en général de sources cadastrales, coupées parfois à celle de la propriété, des réseaux, des sites à risque

industriels, etc. Ce sont des instruments utilisés pour la planification urbaine (Scot et PLU - ex Sdau et POS). Il y aurait sans doute des propositions à faire pour permettre une meilleure comparabilité ou interopérabilité entre ces systèmes d'information, qui se construisent localement. Par ailleurs, se pose la question de la pertinence des territoires d'observation, par rapport aux limites des territoires de gestion : quelle instance pourrait intégrer dans la zone couverte par un Scot ou un PLU les marges rurales sensibles ou les espaces naturels voisins pratiqués par les citoyens ?

6 ■ La discrétion de la recherche française, problèmes de formations

6.1. La recherche

La recherche française est peu impliquée au niveau international. Un seul français anime un des 40 projets de Lucc, mais au titre d'Ispra (F. Achard). L'interview de collègues impliqués par ailleurs dans GCTE, montre une réticence manifeste, avec l'excuse d'une « faiblesse scientifique » de Lucc. Mais, si c'est le cas, est-ce une raison pour l'ignorer ?

On relève également une contradiction « historique » entre le savoir et le savoir-faire français (exemple : la cartographie thématique) et l'implication actuelle. En effet, la France est l'un des premiers pays du monde à avoir mis en place des schémas d'aménagement du territoire (par exemple, les ordonnances de Louis XIV, notamment celle de 1681) et à avoir eu une constance en la matière (quelquefois critiquable, certes). L'école de géographie française s'est distinguée en fournissant des bases géographiques solides, très prisées, notamment à l'étranger. Il existe donc un fonds culturel et technique fort. Mais en pratique, la recherche a-t-elle été interpellée et s'est-elle mobilisée au niveau de l'intérêt et de l'importance du problème ? Le cantonnement dans la géographie, qui eut quelques temps tendance à « couvrir large », a-t-il obliéré les « bonnes volontés » ?

L'une des causes de cet état de fait réside sans doute, comme le soulignait le chapitre précédent, dans la déconnexion des compétences. Par exemple, l'agronomie est principalement cantonnée dans des instituts spécialisés (Inra, Cirad, Cemagref), et dans un enseignement supérieur dédié ; elle est quasi absente dans le secteur académique. En revanche, l'écologie est restée longtemps cantonnée dans ce secteur. L'approche « écologique » des problèmes de l'agriculture, de la forêt (et, dans une moindre mesure, de la pêche) est récente, même si elle est en plein développement. La prise en compte de ces systèmes et de leur gestion par les écologues n'est pas ancienne non plus. On assiste progressive-

ment à une plus grande intégration des points de vue (implication des sciences de l'homme et de la société et des sciences pour l'ingénieur) et au développement de recherches scientifiques dans ce domaine.

Des initiatives nationales n'ont pas été étrangères à ces évolutions (par exemple, les programmes interdisciplinaires du CNRS, des programmes des ministères chargés de l'environnement, la création programmes et de structures interorganismes comme le GIP Ecofor¹¹, etc.). Mais il reste encore à mieux impliquer la recherche scientifique. La France, sur la base de son passé en la matière, de son savoir et de son savoir-faire, a une carte à jouer au niveau international, valorisable en termes d'outils d'aide à la décision et d'ingénierie des territoires.

6.2. La formation

D'après un rapport réalisé pour la Datar (1998), on dénombre de 30 à 40 formations universitaires de niveau 3^e cycle sur la modélisation de l'information géographique dans des SIG. Parmi elles, une douzaine sont spécialisées dans des applications à des questions d'environnement, une dizaine dans les problèmes d'aménagement du territoire et d'urbanisme, mais seulement cinq affichent en priorité la télédétection.

D'après ce même rapport, parmi la centaine de laboratoires de recherche qui modélisent l'information géographique numérique, un quart se rattache aux universités, un quart au CNRS, et la moitié dépend d'établissements spécialisés. Les principales disciplines concernées sont la géographie (28) et l'agronomie (15), voire l'informatique (13), mais au total plus d'une quinzaine de secteurs disciplinaires affichent cette spécialité.

Compte tenu de l'évolution des techniques, les compétences en termes d'interprétation des images qui ont été développées pour faire face aux premiers besoins de la télédétection risquent de ne pas être renouvelées et donc de disparaître. Les besoins de formation sont importants en termes de lecture de cartes, de manipulation des informations géoréférencées, d'identification des structures spatiales, afin de

11. L'un des auteurs de ce rapport a participé à l'élaboration du GIP Ecofor (Écosystèmes forestiers), début des années 1990. En fait, cette opération traduit une révolution dans les habitudes: les forestiers, très centrés sur la production de bois, découvraient l'importance d'une approche écologique des systèmes forestiers; les écologues, s'intéressant plutôt aux systèmes naturels, non perturbés, ne voyaient pas les forêts plantées et gérées comme pouvant constituer un objet intéressant pour leurs recherches. Le rapprochement des points de vues a eut un retentissement bien plus important que la simple constitution de ce GIP. Pour s'en convaincre, il suffit de comparer les publications d'un organisme comme l'ONF avant et après 1990, et de constater l'implication d'écologie dans l'étude des forêts, et plus généralement dans celle de systèmes sous forte influence anthropique.

permettre la construction de représentations spatiales partagées entre scientifiques et acteurs de l'ingénierie des territoires (Maurel).

Conclusion et recommandations

Les changements de couverture et d'utilisation des terres constituent une thématique centrale pour l'ingénierie des territoires. Par ses observations et ses modélisations, elle est reliée aux autres thématiques évoquées dans ce rapport (hydrosystèmes, zones côtières, évolution du climat), et elle constitue le cadre spatial indispensable à toute étude fine des écosystèmes.

La recommandation essentielle, compte tenu de la situation actuelle, est de convaincre la communauté scientifique française de mieux s'impliquer, voire de développer des initiatives complémentaires à celle de LUCC.

Par souci d'efficacité, ces actions devraient être coordonnées avec celles de l'Agence européenne, associer l'en et un réseau d'équipes universitaires et d'organismes spécialisés.

La recherche doit mieux prendre en compte les mécanismes de décision, les aménagements et leurs conséquences, et les institutions qui en décident.

Il faut intégrer les zones de pression anthropique forte: zones urbaines et périurbaines, zones côtières. Développer l'écologie spatialisée et l'écologie de ces systèmes artificialisés (par exemple, l'écologie urbaine). Cela mène, entre autres, à la question-problème suivante: comment articuler cela avec l'écologie sociale urbaine, qui a les mêmes besoins d'information suivie dans le temps, de mesures, de comparaisons, notamment pour l'évaluation des politiques de la ville? Cette intégration est indispensable au développement de recherches pertinentes en amont des nouvelles directives concernant le développement urbain durable.

Il faut également promouvoir une recherche historique spatialisée par régions géomorphologiques et écologiques (histoire de l'occupation des terres en France). Il existe déjà des données et des synthèses, mais la spatialisation est le plus souvent faite à partir des limites administratives, par départements.

La formation des étudiants et des jeunes chercheurs doit prendre en compte ces évolutions. En particulier, il faut inclure dans ces formations les approches dynamiques (données chronoréférencées et modèles dynamiques), et spatialisées (données géoréférencées et modèles spatialisés). Repérer dans l'espace et dans le temps doit devenir un réflexe quasi « culturel ».

Références bibliographiques

- Achard F et al.** (2002). Determination of Deforestation Rates of the World's Humid Tropical Forests. *Science*, **297**: 999-1002.
- Bourgeon PS, Humphries HC, Jensen ME, Brown BA** (2001). Integrated Ecological Assessments and Land-Use Planning. In: *Ecological Principles of Land-Use* (Dale VH, Haueber RA, Eds). Springer-Verlag.
- Commission of the European Communities** (2001). An European Approach to Global Monitoring for Environment and Security. Commission working paper, a joint document from Commission services and the European Space Agency.
- DATAR** 1998. *État des lieux sur les compétences en information géographique numérique dans l'enseignement supérieur et la recherche*. Rapport établi avec le concours de Siage Conseil et de TED Alitec.
- Di Gregorio A, Jansen LJM** (2000). *Land Cover Classification System* (LCCS). FAO, Rome, 179 p.
- Dureau F, Weber C** (1995). *Téledétection et systèmes d'information urbains*. Paris, Anthropos.
- Geist HJ, Lambin EF** (2002). Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *Bioscience*, **52**: 2, 143-150.
- Goldewijk K** (2000). Estimating global land use change over the past 300 years: the Hyde data base. *Global Biogeochemical Cycles*, **15**: 417-434.
- González-Baker S, Gutmann MP, Pullum SM** (1999). *Ethnicity and Land Use in a Changing Environment: The Great Plains in the Twentieth Century*. Annual Meeting of the Population Association of America, 1997.
- Grenier J** (1988). Croissance et déstabilisation: Les conséquences économiques de la croissance démographique. In: *Histoire de la population française* (Ed. Dupaquier J), **2**: 460-468.
- Grenier J** (1988). Croissance et déstabilisation: Les mécanismes de la croissance. In: *Histoire de la population française* (Ed. Dupaquier J), **2**, 438-451.
- GTOS (Global terrestrial observing system)**, 2001- Biennial report 2000-2001.
- Human-Dominated Ecosystems** (1997). *Science*, **277**: 445-608.
- Lambin EF, Geist HJ** (2001). Global land-use and land-cover change: what have we learned so far? *Global Change Newsletter*, **46**: 27-30.
- Liverman D, Moran EF, Rindfuss RR, Stern PC** (1998). *People and pixels, linking remote sensing and social sciences*. National Academy Press, Washington D.C.
- McConnell WJ, Moran EF (Eds)** (2001). *Meeting in the Middle: The Challenge of Meso-Level Integration*. LUCC Report Series, 5.
- Mestayer PG**. *Urban scale models, urban air pollution-European aspects*. Kluwer Acad. Pub., 197-222.
- Pavé A, Laurent C** (2002). Les Très Grands Équipements pour la recherche: vers une nouvelle définition des concepts et des moyens. *Natures-Sciences-Sociétés*, **10**: 2, 80-92.
- Ramankutty N, Goldewijk K, Leemans R, Foley J, Oldfield F** (2001). Land cover change over the last three centuries due to human activities: the availability of new global data sets. *LUCC Newsletter*, **7**: 3-4.

- Schmidt-Lainé C, Pavé A** (2002). Environnement: modélisation et modèles pour comprendre, agir et décider dans un contexte interdisciplinaire. *Natures-Sciences-Société: Sciences pour l'ingénierie de l'environnement*, **10**: s.1, 5-25.
- Stockus A, Bouju A, Bertrand F, Boursier P** (1999). Integrating GPS Data within Embedded Internet GIS. In: *Proceedings of the 7th ACM Symposium on Advances in Geographic Information Systems*. Kansas City, USA.

Annexe 1

L'implication des différents secteurs disciplinaires dans les recherches sur l'environnement. Le cas des sciences de l'homme et de la société

Alain Pavé

Il est bien reconnu maintenant que les recherches sur l'environnement, dont relève une grande partie des recherches sur l'eau et les hydrosystèmes, procèdent d'une approche interdisciplinaire. Dans l'état actuel de l'art, ces recherches sont menées par des équipes dont les membres sont des spécialistes : l'interdisciplinarité s'exprime au niveau collectif, mais qu'en est-il, aujourd'hui, des contributions des divers secteurs ? Par exemple, les sciences de l'homme et de la société sont très sollicitées ; mais après de nombreuses années d'efforts, on doit constater qu'il est difficile de mobiliser des chercheurs de ces disciplines. Quelles en sont les raisons ?

Pour une première approche quantitative, on peut se référer à une enquête réalisée par l'Ifen (Institut français de l'environnement) et le SRAE (Service de la recherche et des affaires économiques) du ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement et publiée en 1998 (*La recherche publique sur l'environnement en France*. Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement – Services de la recherche et des affaires économiques. 1998, 236 p.). Outre le travail spécifique effectué par ce ministère et l'Ifen, les travaux de l'OST³² effectués en 1995 sont repris et actualisés³³. Bien que ces enquêtes datent de plusieurs années, les constantes de temps du dispositif de recherche permettent de penser, qu'au moins dans les ordres de grandeur, les données sont encore d'actualité. Au total, on dénombre 4 572 chercheurs (en équivalent temps plein, hors thésards). Parmi ceux-ci, 2 093 affichent une thématique environnementale comme finalité première (périmètre I) et 2 479 comme objectif second (périmètre II). On peut tirer de ces données une répartition par grands secteurs scientifiques.

32. OST : Observatoire des sciences et techniques.

33. Les organismes producteurs de recherche qui ont participé à cette enquête sont : le BRGM, le CEA, Le Cemagref, le Cirad, le CNRS, le CSTB, l'Ifremer, l'Ineris, l'Inra, l'Ined, l'Inrets, l'Inria, l'Inserm, le LCPC, Météo-France, le MNHN, l'Onera, et l'Orstom (IRD). Les organismes financeurs : le Cnes, le ministère chargé de l'Environnement, l'Ademe.

Tableau Répartition des chercheurs travaillant sur l'environnement par secteurs scientifiques. Ce tableau ne rend qu'imparfaitement compte de la contribution du secteur de l'enseignement supérieur, si ce n'est par le biais des enseignants-chercheurs travaillant dans des unités mixtes. Il ne tient pas compte de la recherche privée, qui dans certains secteurs comme celui des pollutions et dépollutions n'est pas négligeable.

Secteur scientifique	Nombre de chercheurs en ETP (périmètre I)	Nombre de chercheurs en ETP (périmètre II)	Total
Sciences de l'Univers – Sciences de la Planète	531 (25,4 %)	483 (19,5 %)	1 014 (22,3 %)
Sciences de la Vie	759 (36,3 %)	1 286 (51,9 %)	2 045 (44,7 %)
Sciences de l'Ingénieur	556 (26,5 %)	434 (17,5 %)	990 (21,6 %)
Sciences de l'Homme et de la Société ³⁴	247 (11,8 %)	276 (11,1 %)	523 (11,4 %)
Total	2 093	2 479	4 572

On note la prédominance des sciences de la nature (SDU/SPE et SDV) qui représentent 67 % des effectifs, une bonne contribution des sciences de l'ingénieur et une participation modeste des SHS. Dans les sciences de la nature, les SDV se distinguent par une participation massive, principalement de chercheurs relevant de disciplines comme la biologie des populations et l'écologie. On ne peut que souligner ce fait à une époque où, très focalisé sur les aspects génomiques, le secteur SDV a tendance à négliger cette contribution essentielle aux recherches sur l'environnement. Par exemple, on pourra remarquer que le département SDV du CNRS, lancé à juste titre dans une politique de programmation scientifique, n'a pas fait émerger de problématique environnementale. De même, les délibérations du CCSV³⁵ leur font une part mineure.

Le secteur SPI est focalisé, et c'est bien compréhensible, sur les questions relatives à l'énergie, aux matières premières, aux procédés propres et aux systèmes d'épuration. En revanche, tout ce qui concerne l'ingénierie des systèmes écologiques et biogéochimiques est à développer.

Enfin, les sciences de l'homme et de la société, très sollicitées, répondent encore de façon timide. On peut le comprendre, car ces disciplines,

34. Le secteur SHS comprend la géographie. Une estimation de la contribution de ce secteur hors géographie donne environ 115 chercheurs pour le périmètre 1 et 193 pour le périmètre 2, soit au total 308 chercheurs.

35. CCSV : Comité de coordination des sciences du vivant.

hors géographie, ont adopté comme paradigme fondamental l'explication du fait social par des processus endogènes aux sociétés humaines et ne considèrent pas, sinon de façon très marginale, les relations de ces sociétés avec leur environnement et les conséquences que ces relations peuvent avoir sur le fonctionnement de ces sociétés. C'est un point fondamental. En effet, considérer l'environnement comme facteur possible d'évolution sociale demande de remettre en cause les paradigmes fondamentaux de la plupart de ces disciplines. Certains chercheurs commentent néanmoins à s'interroger sérieusement à ce propos. On pourra, par exemple, se référer à la conclusion de la leçon inaugurale de Ph. Descola au Collège de France à propos de la nécessaire considération des rapports de l'homme avec de son milieu dans les recherches anthropologiques³⁶. Une autre cause de la timide participation du secteur SHS réside probablement dans l'aspect très individuel des recherches dans ce secteur qui conduit à des difficultés de coopération à des actions interdisciplinaires et donc collectives. Enfin, on pourra supposer que les excuses souvent avancées « d'instrumentalisation » de ces disciplines ne sont guère recevables, au moins de façon générale. Elles ne le seraient que si cette « instrumentalisation » se confrontait à une dynamique scientifique propre de ces disciplines en matière d'environnement : sauf exception nous sommes toujours en attente de grandes problématiques SHS à ce sujet. En résumé, la mobilisation des sciences sociales passe obligatoirement par une révision des paradigmes fondamentaux de la plupart de ces disciplines. Cette révision, intégrant l'environnement comme facteur possible influençant les dynamiques sociales, serait bénéfique à beaucoup d'entre elles, comme l'histoire³⁷, en leur ouvrant des perspectives nouvelles et en permettant des collaborations à des recherches collectives d'intérêt non seulement scientifique, mais aussi social, économique et culturel.

36. Ph. Descola. Où s'arrête la nature ? Où commence la culture ? Leçon inaugurale au Collège de France (*Le Monde*, 31 mars 2001) : « Il est temps que l'anthropologie conteste un tel héritage et qu'elle jette sur le monde un regard plus émancipé, nettoyé d'un voile dualiste que le mouvement des sciences de la nature et de la vie a rendu en partie désuet, et qui fut à l'origine de maintes distorsions pernicieuses dans l'appréhension des peuples dont les usages différaient par trop des nôtres. L'analyse des interactions entre les habitants du monde ne peut plus se cantonner aux seules institutions régissant la société des hommes, ce club de producteurs de normes, de signes et de richesses où les non-humains ne sont admis qu'à titre d'accessoires pittoresques pour décorer le grand théâtre dont les détenteurs du langage monopolisent la scène. Bien des sociétés dites primitives nous invitent à un tel dépassement, elles qui n'ont jamais songé que les frontières de l'humanité s'arrêtaient aux portes de l'espèce humaine, elles qui n'hésitent pas à inviter dans le concert de leur vie sociale les plus modestes plantes, les plus insignifiants des animaux. L'anthropologie est donc confrontée à un défi formidable : soit disparaître avec une forme épuisée d'anthropocentrisme, soit se métamorphoser en repensant son domaine et ses outils de manière à inclure dans son objet bien plus que l'anthropos, toute cette collectivité des existants liée à lui et longtemps reléguée dans une fonction d'entourage. C'est en ce sens, volontiers militant nous le concédons, que l'on peut parler d'une anthropologie de nature ».

37. On peut s'étonner, par exemple, que les travaux exemplaires d'Emmanuel Leroy Ladurie sur l'histoire du climat n'aient pas donné lieu à la création d'une véritable école.