

INDISCIPLINES

L'interdisciplinarité dans les sciences de la vie

Jean-Marie Legay
Éditeur scientifique



Cemagref
EDITIONS



Ifremer

INRA
EDITIONS

© Cemagref, Cirad, Ifremer, Inra, 2006

Le code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique. Toute reproduction, partielle ou totale, du présent ouvrage, est interdite sans autorisation de l'éditeur et du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) 20 rue des Grands Augustins, 75006.

ISBN 2-7380-1210-8
ISSN 1772-4120

INDISCIPLINES

L'interdisciplinarité dans les sciences de la vie

Jean-Marie Legay
Éditeur scientifique

Préface Claude Millier

Cemagref
EDITIONS



Ifremer

INRA
EDITIONS

La collection « Indisciplines », dirigée par Jean-Marie Legay sous l'autorité de l'Association Natures Sciences Sociétés-Dialogues, a la même orientation thématique que la revue du même nom déjà éditée par celle-ci.

Elle se donne pour vocation d'accueillir des textes traitant des rapports que l'homme entretient avec la nature, y compris la sienne propre, que ce soit à travers des relations directes, ou les représentations qu'il en a, ou les usages qu'il en a fait, ou encore les transformations qu'il provoque, consciemment ou non. Bien entendu, les conséquences que l'homme subit en retour et la façon dont il y répond, soit en tant qu'individu, soit socialement, soit même globalement en tant qu'espèce, intéressent vivement la collection.

Ce sont des questions, on le comprend aisément, qui en appellent à toutes les sciences de la terre, de la vie, de la société, des ingénieurs et à toutes les démarches de recherche, éthique comprise. Ces ouvrages s'attachent à traiter de façon plus profonde, plus générale, plus documentée aussi, de sujets qui ne peuvent être abordés que de manière brève et limitée dans un article de périodique.

La rédaction de ces livres peut être le fait d'un ou plusieurs auteurs, d'un collectif de collègues réunis pour la circonstance ou à l'occasion d'un colloque. Un comité éditorial évaluera la qualité scientifique du manuscrit.

Préface

Claude Millier

5

Quelles pratiques ont les chercheurs en sciences de la vie en tant qu'usagers de l'interdisciplinarité ? La pertinence de cette question est évidente. La centrer sur la biologie résulte des considérations suivantes : l'organisation disciplinaire des sciences de la vie se traduit par un découpage précis mais néanmoins instable : le développement considérable de la biologie moléculaire et la montée en puissance des questions écosystémiques sollicitent ces disciplines par des forces réelles, parfois contradictoires, qui mettent en question ce découpage et les relations entre communautés de chercheurs.

Dans ce contexte général, le mode de production scientifique classique perdure ; orienté sur l'accroissement des connaissances, relayé par les sociétés savantes, les structures d'évaluation, la cohérence des communautés autour des paradigmes, il domine le monde scientifique et explique en grande partie l'irruption de la biologie au tournant du siècle et sa progressive reconnaissance comme « big Science » à l'instar de la physique.

Toutefois, à côté de ce courant dominant, un autre mode de production, orienté vers la résolution de problèmes, jusqu'à présent dilué dans les pratiques des chercheurs s'est développé. On pense bien sûr à des problèmes issus de demandes sociétales mais aussi aux questions que se posent les chercheurs eux-mêmes et qui pour certaines se coulent mal dans l'organisation disciplinaire de la biologie.

La construction scientifique des questions, leur résolution à partir de collaborations entre équipes et entre chercheurs, la reconnaissance « officielle » de ces travaux et leurs effets sur les programmes des équipes sont à analyser et à explorer de manière soigneuse et approfondie en partant des expériences vécues par les chercheurs.

Bien sûr, ce mode de production encourage, exige même souvent l'interdisciplinarité qu'elle soit « proche » (entre disciplines biologiques « voisines ») ou « lointaine » (avec les sciences sociales et humaines et avec les sciences pour l'ingénieur).

L'intérêt de l'association Natures Sciences Sociétés-Dialogues pour ce débat est alors évident et elle a relayé avec enthousiasme la proposition de Jean-Marie Legay d'écrire ce livre dans lequel interviennent des chercheurs couvrant une grande partie du domaine biologique.

Dans l'optique d'un enrichissement des réflexions sur l'interdisciplinarité, les questionnements sont multiples ; sans être exhaustifs, des éclairages seront apportés sur les conditions de l'interdisciplinarité entre disciplines de la biologie (le tronc commun des connaissances facilite-t-il le dialogue et l'efficacité ? Les « conflits de frontières » sont-ils fréquents et comment sont-ils surmontés ?), la construction des problèmes avec des chercheurs très éloignés par leur formation et leurs pratiques des

biologistes, la mobilisation des doctorants dans ces travaux (quels risques ? Quel avenir à l'issue de la thèse ?), la spécificité éventuelle pour l'interdisciplinarité faisant intervenir les sciences de la vie.

En encourageant la mise en perspective de situations de chercheurs très variés, au-delà de leur très grande variabilité, naturelle et justifiée, il est espéré que des « invariants » soient dégagés et bien sûr que ces Journées, par les présentations et les débats, alimentent une réflexion sur l'interdisciplinarité à la fois foisonnante et novatrice.

Claude MILLIER

Président de l'association Natures Sciences Sociétés-Dialogues

Directeur scientifique Ina-Pg et Engref

Sommaire

Introduction	
Jean-Marie Legay	9
Chapitre 1. Itinéraires de palynologues, pratiques pluridisciplinaires d'une expertise d'interface	
Jacques-Louis de Beaulieu	13
Chapitre 2. Réticences disciplinaires en biologie : l'exemple de la théorie chimio-osmotique	
Jean-Claude Mounolou.....	25
Chapitre 3. De l'hydrobiologie à l'écologie du paysage	
Henri Décamps.....	31
Chapitre 4. La médecine de la reproduction : une médecine et des recherches inter- et pluridisciplinaires	
Jean-Claude Czyba.....	39
Chapitre 5. Émergence d'un concept. Un itinéraire entre agronomie et géographie	
Jean-Pierre Deffontaines et Pascal Thimon.....	45
Chapitre 6. Des schistosomes aux autres parasites tropicaux : un espace de dialogue interdisciplinaire	
Claude Combes.....	51
Chapitre 7. Questions biologiques et jeux complexes de données. Une expérience halieutique	
Francis Laloë.....	65
Chapitre 8. Modélisation spatiale et approche agronomique	
Sylvie Lardon.....	85
Chapitre 9. Intégrer les analyses géographiques, écologiques et sociales pour gérer la faune sauvage	
Philippe Clergeau, Gwénaëlle Le Lay et Isabelle Mandon-Dalger.....	103

Chapitre 10. **Interdisciplinarité et biodiversité : un grand défi**
Yvon Le Maho 115

Chapitre 11. **Sur le bon et le mauvais usage des mathématiques et statistiques dans les sciences de l'environnement**
Nigel G. Yoccoz 123

Chapitre 12. **Changements paysagers et transmission de l'échinocoque alvéolaire**
Patrick Giraudoux, Philip S. Craig et Dominique Vuitton 131

Chapitre 13. **La conservation et la gestion de la biodiversité : un défi pour l'interdisciplinarité**
Robert Barbault 151

Les auteurs 171

Introduction

Jean-Marie Legay

La contribution de plusieurs ordres de pensée à la résolution d'un problème n'est pas un phénomène récent. Les questions posées par voie de concours public, ou parfois affichées sur les tours placées de-ci de-là sur les trottoirs à Paris ne s'adressaient pas à une catégorie particulière d'ingénieurs ou de savants (comme on disait à l'époque) ; et l'on attendait avec curiosité les réponses et l'identité de leurs auteurs. C'est ainsi que Lavoisier (1743-1794) se fit connaître à propos de combustion, d'oxygène et de l'éclairage de la ville de Paris, à l'âge de 22-23 ans. Le prix promis fut partagé entre trois fabricants de lanternes, mais l'Académie attribua une médaille d'or à Lavoisier pour l'aspect fondamental de son travail. N'oublions pas que Lavoisier fit d'abord des études classiques, passa ses diplômes de droit et obtint le titre d'avocat en Parlement. C'est seulement en amateur qu'il acquit des notions de botanique, de chimie, de minéralogie, de géologie, et qu'il participa à des levés géologiques en Île-de-France. Il n'entama ses grands travaux scientifiques qu'après son entrée à l'Académie (qui joua, pour lui et pour d'autres, le rôle du CNRS d'il y a quelques années). Malgré la polyvalence de ses compétences, on ne peut pas dire qu'il entreprit des travaux pluridisciplinaires, si ce n'est peut-être en agronomie où il prépara l'œuvre de Boussingault (1802-1887).

Et peu de temps après, au cours du XIX^e siècle, Pasteur n'hésitait pas à présenter à l'Académie des *Notes* sous des rubriques aussi diverses que Biologie, Chimie, ou Microbiologie. C'est pourtant quelques années plus tôt que les efforts de clarification et de classification d'Auguste Comte (1798-1857) quant aux différentes approches scientifiques possibles, qu'on fixât, après définition et délimitation, la plupart des disciplines actuelles.

On peut souligner que pendant plus d'un siècle, on devait se laisser aller à la confirmation, à la consolidation et à l'extension de ce partage. Les structures institutionnelles qui devaient se mettre en place en particulier après 1945, les universités, le CNRS, s'employèrent à soutenir ces divisions. Seuls les organismes de recherche affichant des objectifs d'application donnaient à leurs départements des titres non disciplinaires. Malheureusement sous ces appellations se cachaient dans une large mesure les disciplines classiques, leurs méthodes et leurs limites.

Il faut dire que les progrès techniques et méthodologiques, ainsi que ceux de l'instrumentation et de l'appareillage les accompagnant ne faisaient que conforter les divisions apparues et les écarter davantage les unes des autres.

Il faut dire aussi que l'attribution des crédits était, par décision politique, au moins dans notre pays, inversement proportionnelle à la distance aux applications militaires. Il n'y avait donc rien pour la sociologie ou l'ethnologie, presque rien pour la biologie, tout pour la physique nucléaire ou certains chapitres opérationnels de l'astronomie.

Mais, dans les quarante dernières années, les sujets de recherche vinrent souvent, directement ou non, de la demande sociale, cette « satanée demande sociale » disait Bourdieu. On s'aperçut alors que le progrès socialement enregistré ne procédait pas en droite ligne des résultats scientifiques, mais de leur usage, ou plus exactement de leur mise en œuvre par des intermédiaires socio-économiques, si ce n'est politiques. On découvrit donc, d'ailleurs lentement, que des recherches dans des disciplines très différentes, en tout cas classées dans des chapitres très différents de la connaissance, se révélaient utiles en vue d'une réponse satisfaisante aux questions posées.

Bien entendu, des exagérations se firent jour de tous les côtés. Il y eut, il y a peut-être encore, toute la gamme des opinions, depuis celles de certains scientifiques intransigeants, si ce n'est arrogants, qui disent que seuls leurs résultats peuvent conduire à des conséquences sociales importantes, jusqu'à certains tenants des sciences dites humaines, qui méprisent les acquis scientifiques au point de ne pas les reconnaître, ou même de ne pas les connaître.

Sous-jacente à ce type de polémique, en définitive sans intérêt majeur, se dessinait une bataille territoriale dans laquelle chacun croyait *défendre* sa discipline, ses méthodes, beaucoup moins spécifiques qu'on le prétendait, *défendre* ces questions beaucoup moins originales qu'on ne le revendiquait. Tout cela au point de peser sur les institutions, leurs structures et leurs programmes.

Il est finalement apparu, il n'y a guère plus de dix ans, que, ce qui importait au plus haut point, c'était d'étudier *les questions posées* avant que d'y répondre, d'en découvrir les divers volets, d'essayer d'imaginer l'influence de facteurs apparemment lointains, d'évaluer l'importance actuelle ou dans un futur proche de phénomènes connus, mais isolés ou cloisonnés, cloisonnés par la tradition, l'idéologie, ou tout simplement la commodité ou la routine.

C'est dans ce contexte, en partie confus, que certains chercheurs devaient se placer dans un champ réaliste de contributions multiples de disciplines classiques sans qu'il soit question, au moins au départ, d'en changer le contenu, mais plutôt d'en étendre les compétences. La pluridisciplinarité était née. Et c'est encore aujourd'hui l'objectif raisonnable dans bien des circonstances, en particulier dans celles de l'environnement.

La pluridisciplinarité se construit, en définitive, *en face d'une question posée*, le plus souvent en cours de recherches. Selon les cas, les biologistes, par exemple, commenceront le travail et s'apercevront en cours de route que la sociologie ou la psychologie leur apporteraient des vues nouvelles, peut-être originales, au point de modifier leur propre programme. Dans d'autres cas, le travail est engagé par des démographes, des historiens ou des économistes, et ceux-ci découvriront le poids des conditions biologiques, médicales ou agronomiques, et se décideront à en tenir compte. Cela signifie que, de part et d'autre, des collaborations sont recherchées qui ne sont pas forcément établies au départ du programme.

Cela signifie que *la pluridisciplinarité est une découverte*, au même titre que celle d'un phénomène naturel. Car avant même de l'exploiter, c'est la découverte d'une relation, peut-être d'une corrélation, en tout cas d'une interaction entre des phénomènes réputés jusqu'alors indépendants. C'est pourquoi ce type de découverte, inhabituel, peut devenir choquant. On peut toujours se demander s'il n'y a pas une erreur quelque part. C'est pourquoi dans notre quête de la pluridisciplinarité, nous avons à être particulièrement rigoureux. *Il est tellement facile de se faire une opinion dans une discipline qui n'est pas la sienne.*

Aussi, dans les exemples qui vont vous être présentés, nous avons cherché à être convaincants, même dans les prémisses, même dans les hypothèses de travail, même dans les cas où nous pouvions songer à des évidences. Dans la *recherche* contemporaine, il n'y a plus d'évidence, pas plus qu'il n'y en a de façon plus large dans la *pensée* contemporaine. Il faut se frayer un chemin à travers le champ des possibles pour trouver le *petit* jardin des phénomènes réalisés. C'est là que se tiendra l'interdisciplinarité.

Qui dit pluridisciplinarité dit objet de recherche complexe, avec toute une série de conséquences que nous n'aurons pas toutes le loisir de considérer. Par exemple, que devient la certitude dans ce nouveau contexte ? Nous soutenons l'idée qu'il n'y a plus d'évidence, c'est-à-dire, sans doute pour une question donnée, plus de certitude.

Les sciences de la vie sont en plein développement. Les résultats s'accumulent ; les théories se multiplient. Certains stratèges disent que le XXI^e siècle sera le siècle de la biologie ! Ceci ne va pas sans problème, ni sans difficultés nouvelles.

Ce développement paraît se présenter selon trois champs principaux. D'une part, une activité, en quelque sorte de surface, s'étend ; c'est-à-dire que le domaine s'élargit, les milieux explorés se diversifient ; contrairement à certaines prévisions, ces milieux sont habités ; parfois même, ils sont riches d'organismes aux modes de vie imprévus. D'autre part, elle opère en profondeur : on « descend » aux niveaux cellulaire et moléculaire, qui nous informent toujours, même s'ils ne sont pas toujours explicatifs. Mais en même temps, on « monte » aux niveaux populationnels, écosystémiques, etc., qui expliquent comment les organismes sont en situation de

population, et ne peuvent être compris sans qu'il en soit tenu compte. Enfin le champ peut être historique : que s'est-il passé dans les dernières années, dans les derniers siècles ? Dans chaque cas, la question est posée : quels changements supportons-nous ? Y en a-t-il eu ? Si oui, depuis quand ? Quelles répercussions pouvons-nous détecter aux niveaux d'intégration supérieurs ? Que nous apporte la paléobiologie, la démographie historique ?

À cela s'ajoutent quelques nouveautés. Une biologie humaine est née. À côté d'une médecine s'intéressant aux hommes malades, s'est dégagée – avec quelque mal – une recherche dédiée à la santé de l'homme « normal ».

Enfin, les grands secteurs d'utilisation des résultats biologiques, ou de questionnement des mécanismes biologiques que sont l'agronomie et la médecine, sont de plus en plus demandeurs de faits nouveaux et d'instruments de recherche, mais aussi de moyens de contrôle ou de prévision.

En face de cette situation, instable et foisonnante, la biologie classique ne pouvait participer à ce grand mouvement sans évoluer elle-même, et surtout sans mettre en place de nombreuses collaborations entre disciplines.

Dans certains cas, les liaisons nécessaires se sont établies à l'intérieur même des sciences de la vie, y compris entre disciplines qui avaient suffisamment divergé pour devenir étrangères.

Dans d'autres cas enfin, la barrière disciplinaire est plus éloignée, pas forcément plus difficile à franchir, entre une activité relevant des sciences de la vie, et une autre relevant des sciences humaines, situation que l'on rencontre souvent dans les grands programmes.

Je vous invite donc à accompagner quelques-uns de nos collègues dans les difficultés qu'ils ont eues à partir de certaines impasses et aux recours qu'ils ont recherchés en faisant *d'abord* appel à des efforts pluridisciplinaires, c'est-à-dire en sortant avec plus ou moins d'habileté des limites de leurs disciplines, *puis* en construisant sur des bases devenues solides une véritable interdisciplinarité.

Pour finir, je dirais que je verrais bien deux types d'objectifs à ce livre¹. D'un côté, préciser, éventuellement démystifier, certains phénomènes biologiques, peu ou mal connus, aussi bien par les collègues des sciences sociales que par ceux des sciences biologiques ; de l'autre, découvrir ensemble les moyens de faire émerger des questions communes, acceptables par plusieurs disciplines.

1. Ce livre est issu des communications des Journées de l'association Natures Sciences Sociétés-Dialogues qui portaient sur « L'interdisciplinarité vue et pratiquée par les chercheurs en sciences de la vie » et qui ont eu lieu les 11 et 12 décembre 2002 dans le cadre de l'université Paris X-Nanterre.

Chapitre 1

Itinéraires de palynologues, pratiques pluridisciplinaires d'une expertise d'interface*

Après tout, l'interdisciplinarité devrait être aux sciences ce que la sexualité est à la vie : un outil de brassage qui renouvelle à l'infini la diversité des êtres dans un cas, celle des questionnements et des réponses dans l'autre. Mais pour l'interdisciplinarité, la pratique n'en va pas de soi, si l'on se réfère aux innombrables débats et tentatives de codification qu'elle génère.

C'est au fil de l'itinéraire d'un groupe marseillais de palynologues, depuis sa création au sein du Laboratoire de botanique historique et palynologie (LBHP), il y a quarante ans, jusqu'à sa dissolution dans une plus large structure, l'Institut méditerranéen d'écologie et de paléoécologie (Imep), que seront évoqués quelques croisements avec d'autres champs de recherche. L'histoire de ce groupe peut être considérée à certains égards comme représentative de celle de la discipline. On tentera d'en dégager quelques enseignements sur les enjeux, mais aussi les pesanteurs et les mirages de l'Interdisciplinarité.

POLLEN ET PALYNOLOGIE

Rappel de la méthode

On rappellera tout d'abord que grains de pollen et spores sont des cellules sexuelles assurant la reproduction des végétaux. À ce titre elles intéressent généticiens et agronomes. On sait aussi que le pollen est vecteur de substances allergènes (générant des pollinoses) et intéresse donc la médecine. Mais le développement de la palynologie vient principalement de l'exploitation des grains de pollen pour la reconstruction des végétations et des climats anciens. Cette dernière est rendue possible par la conjonction de trois propriétés :

- ces cellules reproductrices sont généralement produites et disséminées en très grande abondance ;
- elles sont dotées d'une enveloppe protectrice (l'exine) extrêmement résistante, constituée par de la « sporopollénine », qui s'apparente aux matières plastiques : cette résistance garantit au pollen de se conserver indéfiniment pour peu qu'il se soit déposé dans un milieu anaérobie ;

* Chapitre rédigé par Jacques-Louis de BEAULIEU

– les formes infiniment variées de ces enveloppes sont caractéristiques des plantes productrices (à des niveaux systématiques variables).

Il est donc possible d'extraire de grandes quantités de pollen des sédiments anciens (boues lacustres, tourbes, dépôts marins proches du continent...). L'identification d'un échantillon représentatif de ces « assemblages polliniques » permet d'inférer le type de végétation prédominant au voisinage du milieu de dépôt ; des successions d'analyses portant sur des séries stratifiées conduisent à établir les changements environnementaux et climatiques au cours du temps. Le pollen étant transporté par le vent n'est pas, contrairement à la plupart des « macro restes » végétaux, strictement inféodé au milieu de dépôt et donne ainsi accès au « paléo-paysage » et enfin sa dispersion en grande quantité permet des traitements statistiques.

Ces avantages ont valu à l'analyse pollinique de se répandre rapidement depuis les travaux pionniers d'un chercheur suédois, Von Post, au début du siècle et d'exploser à partir des années cinquante (*cf.* Pons, 1958). Son champ d'application majoritaire concernant les derniers millions d'années (Pliocène, Pléistocène, Holocène), périodes pour lesquelles il est possible de rattacher les grains de pollen fossiles à des taxons encore vivants aujourd'hui. (Mais l'on ne doit pas perdre de vue le rôle du pollen et des spores comme marqueur biostratigraphique pour les périodes géologiques plus anciennes et notamment la place de la palynologie dans la prospection pétrolière). Ce dynamisme fera que plusieurs laboratoires européens d'étude du Quaternaire seront pilotés par des palynologues (Cambridge, Lund, Cracovie...)

C'est dans la phase d'expansion de la palynologie que Armand Pons, créa à Marseille en 1964 le LBHP dont les expériences « interdisciplinaires » sont évoquées ici.

Analyse pollinique, discipline aux interfaces, mais discipline à part entière

De la présentation qui précède, il apparaît immédiatement que l'analyse pollinique investit plusieurs champs disciplinaires : elle s'enracine dans la biologie par son objet même d'étude (on ne perdra pas de vue le rôle de la morphologie pollinique en systématique évolutive), mais puisque, en ce qui nous concerne, il s'agit de pollen subfossile extrait d'archives sédimentaires, elle relève aussi des géosciences. Lorsqu'elle aborde des dépôts récents, elle intéresse l'archéologie et l'histoire, interférant ainsi avec les sciences de l'homme. Cet ancrage multiple est évidemment partagé avec l'ensemble des disciplines paléo-biologiques auxquelles beaucoup des considérations qui suivent peuvent s'appliquer.

Cela vaut d'ailleurs aux palynologues d'être dispersés, en fonction d'itinéraires personnels et de formations initiales variables, dans des structures académiques relevant de ces différents champs. En France, on trouve ainsi des palynologues associés au CNRS répartis dans les nouvelles sections 18, 19, 20, 29 et 31.

Cependant, dès sa naissance au sein d'un département de botanique, puis au sein de l'Imep, le LBHP a prôné la priorité de l'enracinement dans la biologie : s'agissant de reconstruire les écosystèmes passés, il est impossible de dissocier écologie et paléoécologie. Sauf à être un strict technicien de la détermination pollinique, le

palynologue se doit de bien connaître la biodiversité et le fonctionnement actuel des écosystèmes pour être capable de décrypter les signaux du passé. La réciproque est exacte : bien difficile d'interpréter les dynamiques actuelles sans une perspective historique bien établie. Le palynologue se doit aussi de maîtriser les principes et les concepts de la biostratigraphie, relevant des géosciences, sous peine d'être incapable de développer des stratégies d'échantillonnage efficaces.

La maîtrise de ces deux cultures et de ces deux langages proches était la pratique courante des pionniers des sciences de la nature ; elle est devenue de moins en moins facile du fait de la masse d'informations aujourd'hui disponible dans chaque champ, source de divergences au niveau conceptuel comme académique. Cependant le succès du concept fédérateur des « Sciences de l'environnement » et des structures institutionnelles qui l'accompagnent (Écoles doctorales, DEA et mastères en « Environnement ») est de nature à recréer cette culture d'interfaces.

La palynologie s'identifie cependant comme une discipline à part entière car elle s'est dotée des outils d'une certaine autonomie dans l'acquisition et l'interprétation de ses données, basée sur un considérable effort de calibration dans l'actuel des processus qui aboutissent à la constitution des assemblages polliniques en leur lieu d'enfouissement :

- travaux sur la quantité de pollen et spores produits par les divers végétaux ;
- travaux sur les modalités de dispersion et de transport de pollen.

(Ces préalables permettent aux palynologues de proposer des reconstructions robustes de paysages anciens avec leur seul objet d'étude.)

Lors de la création du LBHP par A. Pons, l'analyse pollinique n'avait été pratiquée en France que par un petit nombre de pionniers, d'une manière assez rudimentaire (plusieurs autres équipes françaises de palynologie virent simultanément le jour, avec un indiscutable retard vis-à-vis du Nord de l'Europe) et il revenait à notre génération de découvrir un passé de la végétation totalement ignoré, en particulier dans le Sud de l'Europe, en même temps que d'affiner notre outil de travail.

Cette nécessité d'apprentissage d'une méthode et l'enthousiasme de l'acquisition immédiate d'informations totalement inédites nous a conduits à développer (certainement à tort) nos premières recherches d'une manière totalement autonome : l'exploitation des innombrables carottes sédimentaires que nous récoltions se réduisait à l'unique analyse pollinique. Les seuls (mais très efficaces) partenariats étant avec les botanistes actualistes (principalement l'équipe des écologues marseillais pilotée par P. Quézel, aujourd'hui incluse dans l'IMEP, qui inventoriaient les formations végétales méditerranéennes), et avec les spécialistes du ^{14}C sans lesquels il était évidemment impossible de fixer un cadre chronologique aux dynamiques de végétation que nous mettions en évidence. Cette orgueilleuse solitude n'était pas sans avantages : elle a constitué une étape nous permettant d'assimiler les fondements d'une « théorie palynologique », bien exprimée dans l'ouvrage de M. Reille : *Leçons de palynologie et d'analyse pollinique* (1990).

Cette démarche autonome a permis par exemple de reconstituer l'histoire post-glaciaire des forêts du Massif central à partir de l'étude d'une cinquantaine de tourbières (Beaulieu *et al.*, 1988) (*figure 1*).

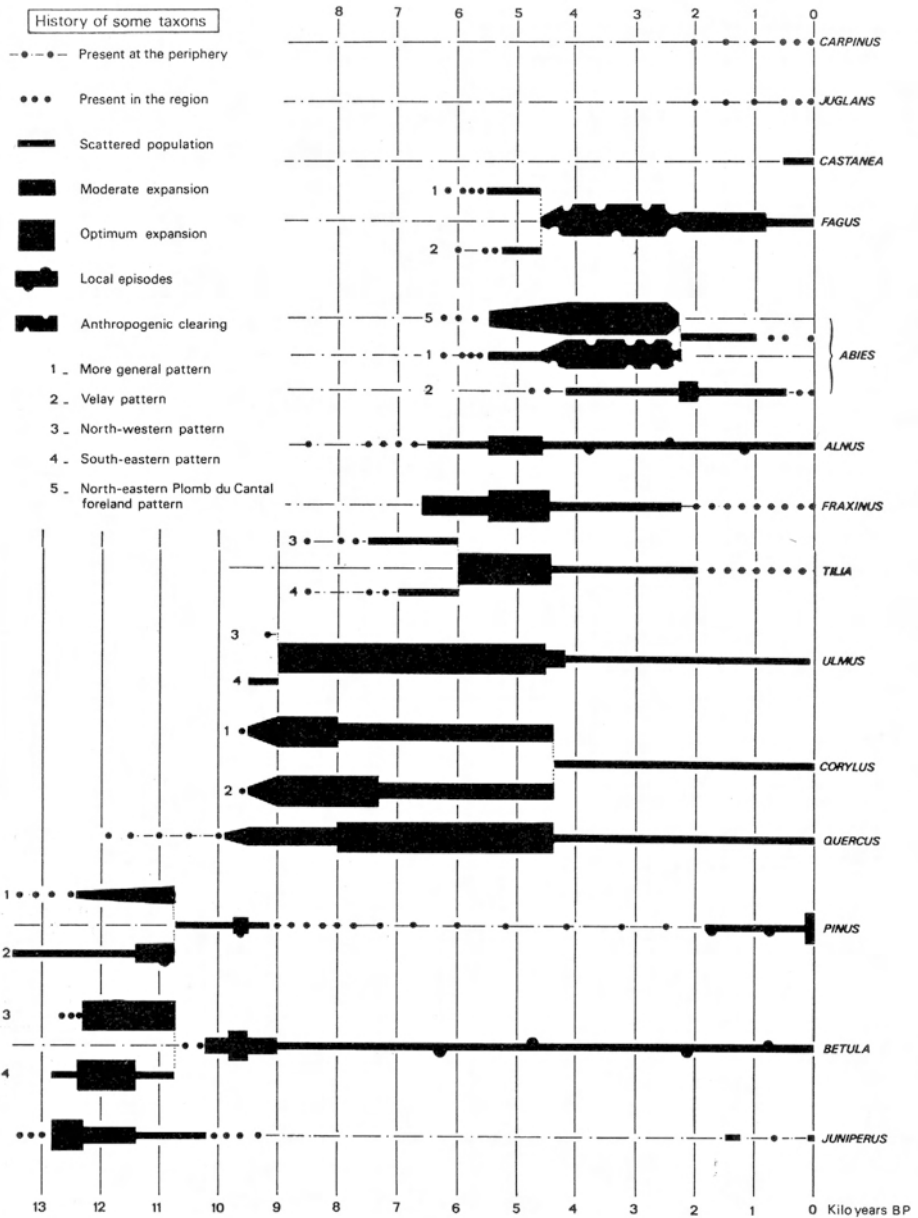


Figure 1. Représentation schématique de la dynamique forestière postglaciaire dans le Massif Central. Les tracés horizontaux pleins plus ou moins épais symbolisent l'apparition, l'expansion et la rétraction des principales essences. L'échelle de temps, en millénaires, fait référence à des âges ^{14}C non calibrés.

« PAST GLOBAL CHANGES »

Dans les années soixante-dix, commencent à émerger les questionnements sur l'avenir de la biosphère dans le cadre des grands changements planétaires ; la théorie astronomique de Milankovich qui relie les variations du climat terrestre à celles de l'insolation aux latitudes nord vient d'être validée par l'astronome A. L. Berger (1977) et par les données de la paléo-océanographie qui a révélé, grâce aux variations des isotopes de l'Oxygène dans les carottes marines, la multiplicité des crises glaciaires au cours du Pléistocène. Dans un premier temps, l'alerte est donnée sur le risque inéluctable d'un retour plus ou moins prochain de la glaciation. Mais les observateurs du climat actuel montrent alors un réchauffement anormal depuis la fin du XIX^e siècle, bien corrélé avec l'accroissement des gaz à effet de serre imputable aux activités de la civilisation industrielle. Les préoccupations des scientifiques gagnent rapidement les sphères politiques et les médias. Les vingt dernières années ont vu fleurir partout dans le monde des programmes de climatologie et de paléoclimatologie destinés à enregistrer, comprendre et modéliser le changement climatique. Cela ne va pas sans une connaissance précise des changements passés. Dans cette perspective, le LBHP est intégré pour la première fois en 1981 à un programme communautaire de paléoclimatologie associant des océanographes, des paléobiologistes continentaux et des modélisateurs du climat. Il nous est demandé de développer une quantification des climats passés, indispensable à la modélisation. J. Guiot, climatologue et mathématicien, intègre notre groupe et développe une fonction de transfert entre assemblages polliniques et paramètres climatiques (Guiot, 1986).

Cependant il convenait de constater que cette approche souffrait de deux handicaps : les reconstructions proposées comportaient des équivoques intrinsèques à notre objet d'étude : dans la mesure où le pollen est transporté par le vent, l'assemblage pollinique rassemble des individus provenant de plantes strictement locales et de formations végétales voisines plus ou moins distantes. Pour faire un tri entre ces différentes provenances, on peut multiplier l'échantillonnage (transects de sondages), mais il est aussi nécessaire de faire appel à d'autres marqueurs paléobiologiques complémentaires (macro restes végétaux, insectes, mollusques...) ou physico-chimiques pour affiner la précision des reconstructions paléoenvironnementales comme paléoclimatiques. C'est ainsi que, dans la mouvance d'un très actif groupe de travail international (PICG 158 : Palaeohydrology of temperate zones during the last 15 000 years), nous avons tenté de promouvoir ou de nous intégrer dans des études paléoenvironnementales pluridisciplinaires. Chacune des spécialités impliquées sait qu'elle n'obtient par ses propres moyens qu'une image plus ou moins parcellaire et biaisée des paléo-milieus, mais de la superposition de plusieurs images plus ou moins floues peut naître un tableau précis du passé.

En l'occurrence, il s'agit de faire converger vers un même objet des sous-disciplines d'une même paléoécologie qui possèdent les mêmes paradigmes et les mêmes stratégies. C'est donc le degré zéro de la pluridisciplinarité. Mais dans les faits, la pratique en est difficile et a mis du temps à se mettre en place, notamment chez les

paléocéologues continentaux, du fait de la rareté (et de la difficulté) de certaines spécialités, de la dispersion géographique des acteurs et du coût d'opérations faisant appel à de nombreux acteurs. Dieu merci, aujourd'hui la plupart des appels d'offre (notamment ceux du programme Eclipse du CNRS) exigent cette démarche « pluridisciplinaire ». Outre la pluridisciplinarité *in situ*, les programmes européens de paléoclimatologie nous ont conduits à confronter nos informations avec celles provenant des carottes marines et des glaces polaires et à explorer, à des fins de comparaisons, des temps plus longs que le postglaciaire. Cette incitation est certainement à l'origine de notre effort, conduit en synergie avec le Laboratoire de géologie du quaternaire de Marseille (aujourd'hui inclus dans le Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement – Cerege), pour extraire des cratères du Velay un exceptionnel enregistrement en continu des quatre derniers cycles climatiques (Reille *et al.*, 2000).

PALYNOLOGIE ET ARCHÉOLOGIE

Nos travaux sur l'Holocène identifient évidemment le signal pollinique des perturbations des écosystèmes par l'homme depuis la fin du Paléolithique. Ceci impose donc un dialogue avec les experts de l'histoire humaine depuis la préhistoire jusqu'à nos jours. Et pourtant ce nécessaire dialogue a longtemps été différé du fait d'incompréhensions réciproques. En effet, au moment où naissait le LBHP plusieurs laboratoires d'archéologie s'adjoignaient les services de palynologues destinés à travailler en milieux archéologiques. Nos quelques expériences dans ce domaine nous avaient convaincus que plusieurs paramètres (mauvaise conservation du pollen dans les sédiments archéologiques aérobies, perturbations des sols du fait des occupations humaines, risques de percolation) en rendaient le plus souvent les résultats ininterprétables en termes de paléoenvironnements (Coûteaux, 1977).

Ces divergences n'ont pas favorisé la mise en commun des jeux d'informations respectifs sur les temps préhistoriques, ce qui est d'autant plus déplorable que presque toutes les connaissances sur les faunes pléistocènes et holocènes viennent des sites archéologiques. De fait, l'archéologie environnementale, bien développée dans les pays anglo-saxons, qui prend en compte toutes les informations disponibles sur un territoire, issues des milieux archéologiques comme de leur périphérie, a tardé à réellement émerger dans notre pays. On peut dire qu'à certains égards elle constitue, pour le passé, une sorte de pendant à l'écologie du paysage qui, vis-à-vis de l'approche phytosociologique, réfute le clivage entre écosystèmes « naturels » et milieux anthropisés. En effet, les deux disciplines se trouvent à cheval entre sciences humaines et sciences « naturelles ».

Il est vrai aussi que notre stratégie initiale d'exploration « extensive » de vastes territoires en vue d'établir des schémas généraux des grandes dynamiques forestières ne laissait alors pas assez de place pour un enracinement régional propice au dialogue avec les autres expertises locales (sauf exceptions comme, en Oisans, les travaux de Coûteaux, 1983).

Cette période « pionnière » prenant fin, nous étions mûrs pour répondre aux incitations structurelles du Programme environnement, vie et société (PEVS) du CNRS (dont on ne soulignera jamais assez le rôle clef dans l'ouverture du dialogue entre sciences de l'environnement et sciences humaines en France), mais surtout aux pressions insistantes de P. Leveau, archéologue classique agitateur d'idées et « passeur de frontières » (Jollivet, 1992), pour entrer dans la dynamique de l'« archéo-écologie du paysage ». Ce fut fait dans le cadre de travaux sur la vallée des Baux-de-Provence (Andrieu-Ponel *et al.*, 2000), puis, plus récemment, du programme « Hommes, troupeaux et forêts dans les Alpes du Sud », financé par le PEVS (Beaulieu *et al.*, 2003) ou encore du projet « plomb ancien du Lozère » piloté par des archéologues paléo-métallurgistes (A. Ploquin, C. Bailly-Maitre), relevant de la zone atelier « arrières pays méditerranéens ». Dans tous ces cas il s'agissait de retourner sur des territoires visités jadis, mais avec des grilles de lecture enrichies par la pluridisciplinarité qui imposaient de nouvelles stratégies d'échantillonnage.

On doit cependant souligner que le dialogue entre archéologues explorant des habitats préhistoriques et chercheurs travaillant sur les zones humides adjacentes demande un dénominateur commun, incontournable pour conjuguer les jeux d'informations, à savoir la chronologie apportée par les datations ^{14}C . Sans un grand nombre de datations, les discours sont pures conjectures. Dans ce domaine, la France est restée trop longtemps sous équipée et condamnée à bâtir des modèles d'âges peu fiables et nous avons perdu pied vis-à-vis de nos voisins. Aujourd'hui, si l'on veut vraiment répondre précisément aux questions d'interactions homme-climat-nature, un effort national assurant un accès aux moyens de datation est absolument nécessaire.

PHYLOGÉOGRAPHIE ET PALYNOLOGIE

Au départ de cette rencontre, deux avancées strictement disciplinaires.

L'European Pollen Database (EPD)

La première avancée concerne les palynologues européens : après une phase exponentielle d'acquisition de données régionales sur l'histoire de la végétation, à partir des années soixante, est apparu l'intérêt de rassembler ces données pour produire des synthèses à l'échelle de l'Europe.

Ce désir était partagé par les écologues biogéographes intéressés par les dynamiques de recolonisations postglaciaires et par tous ceux qui, dans le cadre des grands programmes européens de paléoclimatologie, utilisaient le signal pollinique à des fins de reconstructions climatiques quantitatives et avaient besoin d'une bonne couverture spatiale pour valider ou forcer les modèles de dynamique climatique (« Global Circulation Models ») et les modèles de végétations.

De ce besoin est née en 1989 l'European Pollen Database dont la gestion a été confiée à l'Imep par un bureau international. Grâce à deux programmes européens successifs, la base de données a été construite. Dès l'origine de ce projet, son caractère global était avéré, puisque qu'il a démarré en parallèle avec une initiative simi-

laire en Amérique du Nord, suivie par le lancement de bases de données en Amérique du Sud, en Afrique et en Asie ; toutes ces bases sont fédérées et veillent à maintenir leur compatibilité.

Aujourd'hui plus de 900 séquences polliniques et leurs méta-données sont stockées dans l'EPD, mais c'est loin de représenter la totalité de ce qui pourrait s'y trouver et cet outil demanderait une maintenance permanente qui n'est plus, pour l'instant, financée.

La phylogéographie, point de convergence entre génétique et paléoécologie

La seconde avancée s'est produite dans le champ de la génétique des populations. Dans l'introduction d'un article fondateur « From spatial patterns of genetic diversity to postglacial migration processes in forest trees », R. Petit *et al.* (2001) ont rappelé que la démarche théorique des premiers généticiens des populations (comme le modèle à l'équilibre de Fisher, 1930 et Wright, 1940) les a, dès l'origine, quelque peu éloignés de l'enracinement dans le terrain et de la communauté des biogéographes et des paléo-biogéographes.

L'approche phylogéographique (Avice, 1982) qui replace l'évolution dans l'espace et le temps et explore dans ce cadre la diversité des marqueurs généalogiques devait forcément déboucher sur un dialogue avec ces derniers.

Il y a une dizaine d'années, au moment où naissait l'EPD, plusieurs programmes visant à explorer la diversité génétique de nos arbres forestiers étaient lancés, dont beaucoup pilotés par l'équipe de généticiens forestiers de l'Inra de Bordeaux dirigée par A. Kremer.

Ces derniers venaient de démontrer que, dans le génome des chênes et des feuillus, les paramètres historiques et généalogiques pouvaient être séparés des autres facteurs d'évolution responsables de la diversité génétique en s'adressant au polymorphisme de l'ADN chloroplastique. Les premières expériences sur des populations françaises montraient une distribution géographique non aléatoire d'allèles qui identifiaient des sous-populations infra-spécifiques. Celle-ci ne pouvait être expliquée que par les aléas de la colonisation postglaciaire de l'Europe moyenne et septentrionale à partir de ces refuges méridionaux (Espagne, Italie, Balkans). Pour beaucoup de paléoécologues, ce fut une surprise, car nous étions persuadés que les déforestations amorcées depuis le Néolithique, puis les aléas des reboisements et de la sylviculture, devaient avoir effacé ou déstructuré l'héritage forestier holocène. Mais, puisqu'il n'en était pas ainsi, le dialogue pouvait s'établir, une des vocations de la base de données pollinique étant justement de reconstruire les dynamiques forestières postglaciaires. Dans le cadre des deux programmes européens Fairoak et Cytofor (piloté par R. Petit), R. Cheddadi, gestionnaire de l'EPD, et ses collaborateurs ont pu construire des cartes de migrations des Chênes d'abord, précisant l'origine spatiale des 32 haplotypes identifiés par les généticiens, puis d'autres essences (Brewer *et al.*, 2002, Petit *et al.*, 2002).

Par la suite, une étape nouvelle dans la collaboration a été franchie avec le projet Fossilva consacré à six arbres forestiers : à coté de l'approfondissement des travaux communs antérieurs et du lancement d'une base de donnée sur les macro fossiles, il s'agissait de récolter du matériel fossile et de tenter d'en extraire de l'ADN pour vérifier si les lignées actuelles étaient ou non les héritières d'anciennes populations. Ce projet vient de s'achever et c'est trop tôt pour en présenter un bilan. On retiendra ici qu'il a réuni une proportion équilibrée de généticiens forestiers (huit équipes) et de paléoécologues (huit équipes) du Sud de l'Europe, qu'il a ainsi constitué un *melting pot* de cultures différentes et qu'il a été un vivier pour d'ultérieures interactions régionales qui se dessinent déjà.

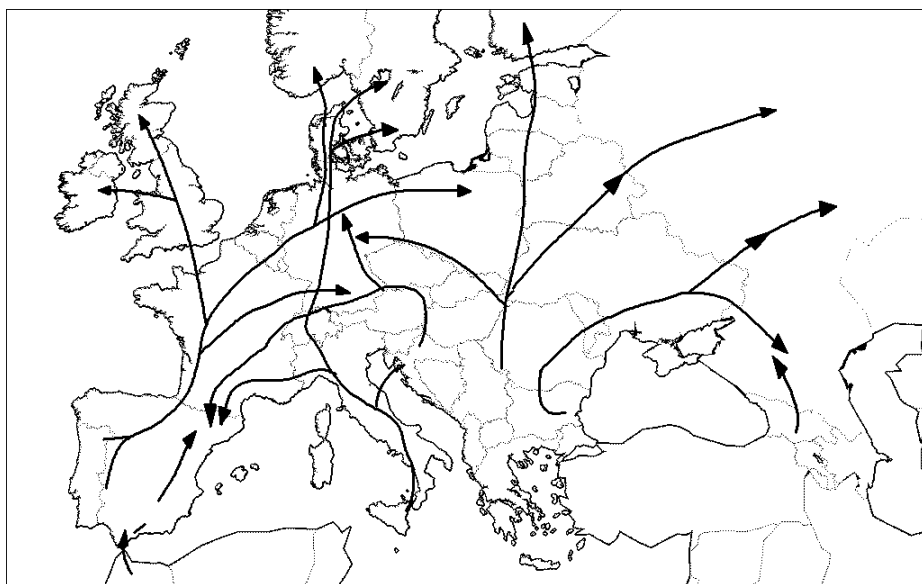


Figure 2. Routes de colonisation holocène de 32 génotypes (simplifiées).

Les tracés fléchés correspondent aux routes de colonisation de différents groupe de génotypes de chêne blanc. Ces routes sont déduites du croisement entre la distribution actuelle de ces allèles et les données sur les refuges glaciaires ainsi que sur la chronologie de l'expansion postglaciaire des chênes, données issues de la Base européenne de données polliniques.

Exemplarité d'une rencontre

Paléo-palynologie et génétique des populations sont des lignées de la biologie qui ont divergé depuis suffisamment longtemps pour n'avoir pas grand-chose de commun en termes de concepts fondateurs, de vocabulaires et de modes opérationnels. Il a fallu un sérieux effort de mise à niveau pour que nous arrivions à nous comprendre, mais on a dit à juste titre que le moteur d'une saine pluridisciplinarité était l'égoïsme. Il faut que chaque partie voit dans l'autre un moyen d'avancer. En l'occurrence, les phylogéographes possèdent des outils exceptionnels de description de

la biodiversité, mais ne disposent d'aucune clef pour en démontrer l'origine ; de leur côté, les palynologues n'ont qu'une très médiocre perception systématique, bien des grains de pollen n'étant déterminables qu'au niveau de la famille ou du groupe de genres (si la jonction a été établie avec des généticiens forestiers, c'est bien parce que les arbres européens se prêtent facilement à une détermination au niveau du groupe d'espèces ou de l'espèce). En associant les connaissances sur la diversité infraspécifique actuelle et sur la chronologie de l'arrivée des espèces sur différents points de la grille européenne, les trajectoires de dispersion des différentes lignées de chênes blancs ont pu être reconstruites (*figure 2*), les vitesses de migrations affinées, contribuant à l'établissement de modèles réalistes de dispersions. Dans cette affaire, chacun y a « retrouvé son compte ».

EN GUISE DE DISCUSSION

Les rencontres interdisciplinaires

Le préliminaire à la mise en commun pluridisciplinaire est que des groupes s'identifient comme représentatifs d'une discipline et développent les outils conceptuels et techniques leur permettant d'apporter leur élément de réponse à leur questionnement. Sans cette relative autonomie, le dialogue pluridisciplinaire ne peut être que cacophonie. Vient l'étape suivante, pluridisciplinaire, qui doit découler de la précédente et dont le bon démarrage ne peut être que le désir de trouver hors de son champ de vision une réponse à des questions issues de ses propres avancées. « Qui pouvaient bien être les gens qui cultivaient les plantes dont je trouve les grains de pollen dans ma tourbière ? » : le palynologue doit aller vers l'archéologue ; comment et quand cet arbre, dont j'identifie un génotype particulier, est-il arrivé dans ma forêt ? » : le généticien doit interroger le paléobotaniste. Encore faut-il qu'un partenaire soit identifié et qu'il soit prêt à répondre aux questionnements de l'autre. Si l'outil de l'EPD n'avait pas été en cours de construction lors de nos contacts avec les généticiens forestiers bordelais, la collaboration n'aurait pas été rapidement efficace et ils se seraient probablement contentés de puiser dans la littérature une information de deuxième main. Et de fait, bien des projets sont mort-nés faute d'experts disponibles dans la discipline sollicitée.

Il y a aussi les « mariages de raison », les rencontres provoquées par les institutionnels de la recherche et leurs incitations ont pu, effectivement, obliger les équipes à sortir de leurs routines. Comme on l'a dit, le PEVS du CNRS a joué un rôle exemplaire dans ce domaine. Aujourd'hui le CNRS affiche la pluridisciplinarité comme objectif prioritaire (mais ne peut s'affranchir des classiques découpages et redécoupages en sections). On ne peut que souscrire aux propos de Bley (2004) suggérant que la gestion de la pluridisciplinarité soit le fruit d'un dialogue entre les organismes et les chercheurs de base (et, bien entendu, *Natures Sciences Sociétés* a un rôle à jouer dans ce dialogue), l'incitation institutionnelle pouvant s'appuyer sur quelques expériences pionnières réussies.

Les niveaux de l'interdisciplinarité

Sans gloser sur la terminologie, on se contentera de relever que la nature et la taille de l'objet étudié, ou la confrontation entre objets adjacents, déterminent des niveaux différents de structuration de l'interdisciplinarité. Comme on l'a vu dans nos relations avec les grands chantiers du « Past Global Change » le degré zéro de l'interdisciplinarité consiste à rassembler autour d'une carotte, continentale, marine ou de glace, le plus grand nombre possible d'expertises, somme toute assez proches. Dans ce domaine, les sciences marines, et la glaciologie, grâce à l'efficacité de quelques responsables charismatiques, ont obtenu les moyens considérables d'exploration d'espaces vierges leur permettant d'acquérir des résultats magnifiques. Dans ce cas, c'est l'ampleur des opérations et de leurs budgets qui leur imposent une rigueur « militaire » et verrouille la pluridisciplinarité. Les spécialistes des « surfaces continentales » se sont vu reprocher leur dispersion et leur manque d'efficacité par cette communauté soucieuse de modéliser les interactions entre océans/atmosphère/continents. Plusieurs réunions ont été organisées au chevet du « malade » pour l'aider à se structurer. Il convient d'insister sur le fait que le domaine continental est le territoire de l'homme et que, si les équipes, pour d'évidentes raisons historiques, sont dispersées autour d'approches régionales et d'objets multiples, ce qui n'a pas lieu d'être sur la banquise, les questionnements sont autrement complexes et les besoins interdisciplinaires se situent à un autre niveau, imposant le dialogue, encore barbare pour certains physiciens, entre Sciences de la Nature et Sciences de l'Homme.

Le vécu de l'interdisciplinarité

Dans un monde scientifique régi plus que jamais par une compétition qui approche de la lutte pour la vie, au niveau des individus comme des groupes de pression, les pratiques pluridisciplinaires sont celles des hommes et elles sont tributaires de contraintes propre à leur nature. Dans ce contexte, si le moteur du désir d'échange meurt, si la méfiance s'installe, la fécondité dont j'ai donné quelques exemples cesse ; c'est le divorce et la négation de l'autre. J'ai gardé en mémoire quelques projets ambitieux auxquels j'ai participé et qui n'ont pas atteint leurs objectifs, brisés par des conflits de personnes, ou la conviction (parfois réciproque) des uns d'être exploités par les autres. On ne saurait donc trop inviter les esprits créatifs, les valeureux « passeurs de frontières » à se montrer à la fois enthousiastes et réalistes dans leur démarches et à ne s'y engager qu'après avoir défini avec soin les termes du contrat de mariage qui leur permettra d'avancer sans malentendus !

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDRIEU-PONEL V., PONEL P., BRUNETON H., LEVEAU P., BEAULIEU J.-L. DE, 2000, Palaeoenvironments and cultural landscapes of the last 2000 years reconstructed from pollen and coleopteran records in the Lower Rhône Valley, southern France, *The Holocene*, 10, 3, p. 341-355.
- AVISE J. C., 1992, Molecular population structure and the biogeographic history of a regional fauna: a case history with lessons for conservation biology, *Oikos*, 63, p. 62-76.
- BEAULIEU J.-L. DE, LEVEAU P., MIRAMONT C., PALET J.-M., WALSH K., COURT-PICON M., RICOU F., SEGARD M., SIVAN O., ANDRIEU-PONEL V., BADURA M., BERTUCCHI G., BOUTTERIN C., DURAND A., EDOUARD J.-L., LAVOIE M., MORIN A., MOCCI F., PONEL P., POTHIN A., PY V., TALON B., TZORTZIS S., BONET R., COLUMEAU P., CORTOT H., GARCIA D., 2003, Changements environnementaux postglaciaires et action de l'homme dans le bassin du Buëch et en Champsaur, Hautes-Alpes, France. Premier bilan d'une étude pluridisciplinaire, in T. MUXART, F.-D. VIVIEN, B. VILLALBA, J. BURNOUF (dir.), *Des milieux et des hommes : fragments d'histoires croisées*, Paris, Elsevier, coll. « Environnement », p. 93-100.
- BEAULIEU J.-L. DE, PONS A., REILLE M., 1988, Histoire de la végétation du Massif Central, France, depuis la fin de la dernière glaciation, *Cahiers de Micropaléontologie*, NS, 1988, 3 (4), p. 5-6.
- BERGER A. L., 1977, Power and limitation of an energy-balance climate model applied to the astronomical theory of climates, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 21, p. 227-235.
- BLEY D., 2004, L'interdisciplinarité au CNRS : un témoignage de chercheur sur la réforme des sections du département SHS, 1991-2003, *Natures Sciences Sociétés*, 12, p. 59-62
- COÛTEAUX M., 1977, À propos de l'interprétation des analyses polliniques de sédiments minéraux, principalement archéologiques, in Approche écologique de l'homme fossile, Suppl. *Bulletin AFEQ*, p. 259-277.
- COÛTEAUX M., 1983, *Déboisements d'altitude par les charbonniers de l'Oisans : contribution pollenanalytique*, 108e Congr. Soc. Sav. Grenoble, p. 115-129.
- GUIOT J., 1986, A method for palaeoclimatic reconstructions in palynology based on multivariate time-series analysis, *Géographie Physique et Quaternaire*, 39, p. 115-125.
- FISHER R. A., 1930, *The general theory of Natural selection*, Oxford, Clarendon Press.
- JOLLIVET M. (dir.) 1992, *Sciences de la nature, sciences de la société. Les passeurs de frontières*, Paris, CNRS Éditions, 590 p.
- PETIT R. J., BIALOZYT R., BREWER S., CHEDDADI R., COMPS B., 2001, From spatial patterns of genetic diversity to postglacial migration processes in forest trees. Special Symposia of The British Ecological Society: « Integrating Ecology and Evolution in a Spatial Context » Edited by SILVERTOWN J., and ANTONOVICS J., Blackwell Science Ltd., Chapter 14, p. 295-318.
- PETIT R.J., BREWER S., BORDÀCS S., BURG K., CHEDDADI R., COART E., COTTRELL J., CSAIKL U.M., VAN DAM B., DEANS J. D., FINESCHI S., FINKELDEY R., GLAZ I., GOICOECHEA P. G., JENSEN J. S., KÖNIG A. O., LOWE A. J., MADSEN S. F., MATYAS G., MUNRO R. C., POPESCU F., SLADE D., TABBENER H., DE VRIES S. G. M., ZIEGENHAGEN B., BEAULIEU J.-L. DE, KREMER A., 2002, Identification of refugia and post-glacial colonisation routes of European white oaks based on chloroplast DNA and fossil pollen evidence, *Forest Ecology and Management*, 156, p. 49-74.
- PONS A., 1958, *Le pollen*, Paris, PUF, 126 p.
- REILLE M., 1990, *Leçons de palynologie et d'analyse pollinique*, 206, Paris, CNRS Éditions.
- REILLE M., BEAULIEU J.-L. DE, SVOBODOVA H., ANDRIEU-PONEL V., GOEURY C., 2000, Pollen biostratigraphy of the last five climatic cycles from a long continental sequence from the Velay region, Massif Central, France, *Journal of Quaternary Science*, 15, 7, p. 665-685.
- WRIGHT S., 1940. The breeding structure of populations in relation to speciation, *Am. Nat.*, 74, p. 232-248.

Chapitre 2

Réticences disciplinaires en biologie : l'exemple de la théorie chimio-osmotique*

Le champ d'action de la biologie est riche et complexe. Il s'étend des molécules aux communautés vivantes et à la biosphère. Il est l'héritage de quelques quatre milliards d'années d'évolution (Purves *et al.*, 1994a). Au cours des derniers millénaires, les hommes et leurs sociétés se sont installés dans le rôle d'acteur principal du théâtre du vivant. Ils en ont entrepris l'exploration. Les biologistes chargés de cette tâche de recherche ont aujourd'hui, pour l'observateur extérieur, une démarche faite de trois parties :

- une question attire l'intérêt du biologiste. Il l'analyse, la décompose et en reformule certains aspects selon les principes de la discipline (selon les principes de la méthode expérimentale) ;
- il en traite ensuite en spécialiste et reçoit en retour la reconnaissance de ses pairs pour la contribution de connaissance apportée ;
- enfin viennent des opérations d'enseignement et, parfois, d'expertise ou d'application qui ont certaines caractéristiques d'interdisciplinarité.

Ce système produit des connaissances et entretient la satisfaction des chercheurs et des utilisateurs d'expertise. Mais il laisse croire aux biologistes que la complexité du vivant et la diversité des voies de leur étude leur garantissent un savoir, un pouvoir et des pratiques interdisciplinaires. Ceci est une faiblesse qui a deux conséquences : sur l'instant, l'intervention d'une autre discipline dans le champ de la biologie est mal vécue. Dans la durée, la formation en biologie ne prépare pas suffisamment à l'interdisciplinarité et n'incite pas à se saisir de questions formulées par d'autres.

En bref, les biologistes ont du mal à entendre A. F. Schmid quand elle tente de les convaincre que l'interdisciplinarité ne vient pas après les disciplines mais avec (Schmid, 2004a et 2004b). Il leur faut aussi un grand effort pour accepter que l'interdisciplinarité, comme dans l'exemple développé par H. Décamps sur la contribution de l'hydrobiologie à l'écologie du paysage, soit une construction dans laquelle une discipline s'insère sans se diluer. La façon dont, dans le domaine de l'énergétique biologique, la théorie chimio-osmotique a émergé et les difficultés de son acceptation par la communauté scientifique, illustrent ce propos.

* Chapitre rédigé par Jean-Claude MOUNOLOU

DIFFICULTÉS VÉCUES PAR LES BIOLOGISTES

Pourquoi a-t-il fallu dix bonnes années pour que la théorie chimio-osmotique s'impose ? Il apparaît que la majorité des biologistes des années soixante n'était pas prête à entendre Mitchell (Mitchell, 1961) pour deux raisons propres à la discipline : une certaine ignorance en chimie et le poids de l'académisme.

La lacune première était sans doute l'ignorance en chimie moderne, et en particulier en physico-chimie, des chercheurs jeunes et moins jeunes formés en France depuis les années quarante-cinq-quinquante. Les membranes n'étaient pas réellement conçues comme des systèmes complexes, hétérogènes, asymétriques et actifs. La connaissance des potentiels électrochimiques était l'apanage d'une fraction des physiologistes (ils en faisaient même un critère de leur identité et de leur supériorité). En bref, les biologistes « moyens » n'étaient pas assez cultivés dans les autres disciplines scientifiques pour recevoir le message du chimiste Mitchell.

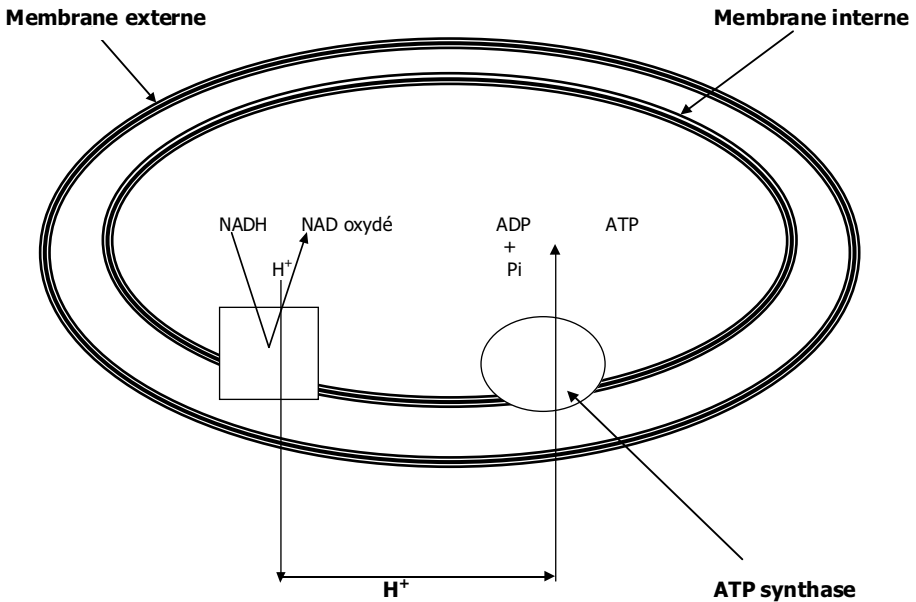


Figure 1. Représentation schématique du couplage indirect entre l'oxydation des substrats carbonés et la synthèse d'ATP dans une mitochondrie.

La mitochondrie est un organite cellulaire à deux membranes, l'une externe, l'autre interne. La cascade des réactions de dégradation des molécules carbonées de la cellule s'achève, après de multiples transformations, par la respiration et consomme de l'oxygène. D'un point de vue chimique, il s'agit, à la fin, de l'oxydation de molécules appelées NADH. L'opération a lieu dans la membrane interne et mobilise localement un ensemble de catalyseurs enzymatiques. Elle libère les dérivés NAD oxydés et des protons H⁺. La théorie chimio-osmotique (Mitchell, 1961) propose que les protons H⁺ sortent de la mitochondrie en traversant les membranes, alors que les molécules NAD oxydées restent à l'intérieur. Les protons sortis en abondance créent une différence de potentiel électrochimique entre l'extérieur et l'intérieur de la mitochondrie. Ils retournent ensuite dans l'organite. L'énergie produite par leur passage dans un canal spécialisé, appelé ATP synthase, permet localement la synthèse d'ATP en associant à la molécule ADP un phosphate inorganique P_i.

L'académisme a aussi sa part dans les difficultés vécues par les biologistes. D'abord le dogme du couplage direct avait une telle pertinence et était tellement ancré par l'enseignement de la biochimie dans les esprits qu'il ne pouvait pas être remis en question. Ensuite la démarche scientifique de Mitchell secouait les pratiques intellectuelles. Mitchell appuyait sa réflexion sur des expériences fortes et rigoureuses ; les résultats servaient à bâtir une théorie. Mais il n'avait pas épuisé toutes les expérimentations possibles pour la valider et rien n'assurait l'universalité de son raisonnement. La communauté académique s'inquiétait donc de cette situation : les uns, très prudents, estimaient que l'on ne lance pas une théorie sans en être « absolu » sûr. Les autres demandaient des preuves expérimentales supplémentaires pour accepter certains aspects provocateurs (par exemple : le transport initial de protons contre le gradient de diffusion, figure 1).

Placés dans cette situation les laboratoires ont dû investir dans des protocoles expérimentaux pour asseoir la théorie. Les chercheurs pour leur part ont dû franchir la barrière disciplinaire pour s'instruire autrement, faire appel à des collaborations extérieures et finalement réaliser ces expériences de validation.

UNE RUPTURE ÉPISTÉMOLOGIQUE

Pour faire sienne la théorie chimio-osmotique, il faut d'abord comprendre qu'une force électromotrice (ici proton-motrice) n'est pas un objet biologique en soi mais la propriété collective d'un système. En 1961, tout imprégnés de la matérialité de l'ATP et du couplage direct, renforcés par la découverte alors récente de l'objet ADN et du dogme central de la biologie moléculaire en épanouissement, les biologistes avaient grand mal à accepter la rupture épistémologique à laquelle les invitaient Mitchell et ses collaborateurs.

La propriété, collective et distribuée, des protons et des membranes permet l'expression d'une fonction biologique identifiée, la synthèse de l'ATP. Cette façon de penser tranche avec la vision établie de l'objet biologique individuel, palpable et responsable : la molécule, la cellule, l'animal, l'espèce... Elle oblige à une réflexion systémique. Elle pose à la frontière chimique du vivant – au niveau des atomes et des molécules – des problèmes qui ont des analogies formelles avec ceux que l'on rencontre à une autre extrémité, quand l'écologie se préoccupe du rôle fonctionnel des espèces dans un écosystème par exemple. Dans un cas comme dans l'autre, la limpidité apparente d'une expression, simplificatrice et abusivement étendue, des dogmes de la biologie moléculaire et cellulaire peut cacher la nécessité de la réflexion systémique. En prendre conscience et s'en affranchir demande un effort de rupture et une culture de l'interdisciplinarité. Il n'est pas toujours certain que tous les biologistes aient encore aujourd'hui fait ce chemin...

RÉTICENCES DES BIOLOGISTES

Accepter en 1961 la théorie chimio-osmotique posait un autre problème. Elle marquait en effet une nouvelle intrusion des chimistes et des physiciens, et de leur pou-

voir, dans le domaine de la biologie. Les biologistes avaient déjà dans le passé vécu trois intrusions majeures et ils estimaient en avoir triomphé : apports des chimistes à la pharmacie (médicaments) et à l'agronomie (engrais), identification des constituants chimiques de la matière vivante (l'ATP par exemple), identification de l'information génétique à la séquence des bases de l'ADN. En 1960, la biologie se flattait d'attirer les scientifiques des autres disciplines comme des mercenaires fascinés par la beauté intellectuelle de ses problématiques.

À la différence des cas précédents, l'initiative intellectuelle de la rupture épistémologique venait d'une autre discipline. Un danger menaçait l'identité des biologistes, leur visibilité sociale et institutionnelle, les moyens de recherche mis à leur disposition. On comprend que la communauté ait alors déployé beaucoup d'efforts pour valider la théorie chimio-osmotique, la faire sienne et organiser en conséquence sa défense sociale. Les comités Nobel en tiendront compte : en 1978, Mitchell a un prix de chimie, mais le discours de réception du lauréat est entièrement dédié à la biologie et à la bio-énergétique (Ernster, 1978) !

Quelques années plus tard, Arber, physicien de formation, recevra le prix Nobel de physiologie et de médecine pour ses travaux portant sur des objets chimiques – les enzymes de restriction – qui se sont avérés essentiels aux avancées de la biologie moléculaire et de la génomique ! Les mentalités et le rapport social entre les disciplines a donc commencé à évoluer.

Peut-on en conclure que, pour bien vivre l'interdisciplinarité en biologie, il faut être largement instruit et avoir de l'initiative ?

UN BILAN EN DEMI-TEINTE

L'intrusion de la physico-chimie moderne dans le domaine biologique est un succès avéré. La théorie chimio-osmotique a obligé les biologistes à développer la réflexion systémique à un niveau d'organisation du vivant où ils n'étaient pas préparés à la conduire. La pertinence des résultats qui ont nourri la controverse, et l'accumulation des données issues des nombreuses validations expérimentales qui ont suivi ont ouvert des champs de recherche originaux. Ceux-ci ont été explorés activement par les biologistes depuis. Ces recherches ont fait et font encore progresser la connaissance des mécanismes de transports transmembranaires dans la cellule (Purves *et al.*, 1994a et 1994b), comme celle des échanges de signaux moléculaires entre cellules et entre individus (Purves *et al.*, 1994c)... L'énergétique du vivant (respiration, photosynthèse) est une science constituée et reconnue (Vignais, 2001 ; Weil, 2001). La découverte des canaux ioniques (généralisations des canaux à protons de la théorie initiale) et de leur diversité est une clé de l'essor de la neurobiologie et de thérapies appliquées à des pathologies nerveuses. Le développement des recherches sur le cerveau qui en découlent actuellement, ouvre des perspectives en médecine, en psychiatrie (Ascher, 2000 ; Guyotat, 2000) et en psychologie (Parot, 2000)...

Pourtant, plus de quarante ans après la publication originale de Mitchell (1961) et en dépit du succès avéré, les suspicions et les réflexes de protection vis-à-vis de l'interférence d'une pensée d'origine disciplinaire différente dans la démarche des

biologistes restent forts. D'une part, en qualifiant de manière assez réductrice le champ scientifique ouvert par la théorie chimio-osmotique de bio-énergétique, les biologistes maintiennent ce domaine en position seconde dans les enseignements universitaires et dans les agendas des institutions de recherche. D'autre part, la neurobiologie a profité de sa spécificité d'objet – le cerveau – pour affirmer son indépendance, et la contribution fondamentale des chimistes dans ce domaine n'est qu'une parmi d'autres. Enfin, la bio-énergétique n'a pas bénéficié, comme la radiobiologie et l'imagerie, de l'effet d'entraînement et de nécessité sociale qu'ont constitué pour ces deux secteurs leurs applications médicales, la création de services hospitaliers et de filières spécialisées de l'industrie.

Aujourd'hui, il apparaît que cette intervention de la chimie dans la démarche de la biologie a d'abord eu un impact considérable sur l'avancée des connaissances. En second point et à cause de la menace sur leur pouvoir et leur discipline, les biologistes ont réagi en encadrant strictement cet apport. Ils ont veillé à conserver l'identité « biologique » de la neurobiologie, aidés en cela par l'absence de relation étroite avec les besoins immédiats de la société. Enfin et à long terme, le progrès conceptuel issu de la rupture épistémologique de 1961 entre peu à peu dans la formation. Une pratique de la réflexion systémique fait ainsi progressivement sa place. Si l'évidence de sa pertinence, quand sont considérés les problèmes de la biosphère et des écosystèmes, ne fait plus de doute, on en trouve maintenant les marques, et de plus en plus souvent, les marques au niveau moléculaire, comme par exemple dans l'étude des processus épigénétiques ou du transfert d'informations.

Finalement, au-delà de relations propres à la biologie et à la chimie, l'exemple de la théorie chimio-osmotique révèle deux aspects plus généraux du développement de l'interdisciplinarité. Le premier, le plus évident, est le défaut d'entretien d'une culture scientifique générale pour les spécialistes d'une discipline. Cela constitue un frein et suggère que la réflexion sur la mission de l'enseignement, la formation et l'académisme est loin d'être achevée... Le second aspect, moins directement perceptible mais tout aussi important, concerne les conditions d'émergence et de développement d'une démarche interdisciplinaire. Quelques questions permettent d'en prendre la mesure : qui est demandeur d'interdisciplinarité ? Qui en prend l'initiative ? Qui conduit la démarche ? Comment cette conduite est-elle appréciée et renouvelée ? Comment le produit de l'opération interdisciplinaire trouve-t-il une place dans le corps des connaissances et dans la construction sociale ? Sur ces interrogations et pour continuer à cheminer avec les biologistes, d'autres « expériences de rencontre » (sciences sociales/biologie par exemple) pourraient être utiles à examiner et à comparer.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASCHER PH., 2000, Les signaux neuronaux, in MICHAUD Y. (dir.) *Qu'est-ce que la vie ?* Université de tous les savoirs, Paris, Odile Jacob, 1, p. 398-409.
- ERNSTER L., 1978, The Nobel Prize in Chemistry, presentation speech, Nobel Lectures, Chemistry, 1971-1980, p. 3.
- GUYOTAT J., 2000, Les maladies mentales et les dépressions, in MICHAUD Y. (dir.) *Qu'est-ce que l'humain ?* Université de tous les savoirs, Paris, Odile Jacob, 2, p. 399-409.
- MITCHELL P. D., 1961, Coupling of phosphorylation to electron and hydrogen transfer by a chemio-osmotic type mechanism, *Nature*, 191, p. 144-148.
- PAROT F., 2000, La psychologie : les conditions de la survie, in MICHAUD Y. (dir.) *Qu'est-ce que la société ?* Université de tous les savoirs, Paris, Odile Jacob, 3, p. 29-37.
- PURVES W. K., ORIANIS G. H., HELLER H. C. ET LONDON J., 1994a, La biologie, in *Le Monde du Vivant*, Sciences, Paris, Flammarion, p. 1-18.
- PURVES W. K., ORIANIS G. H., HELLER H. C. ET LONDON J. , 1994b, La cellule, in *Le Monde du Vivant*, Sciences, Paris, Flammarion, p. 21-185.
- PURVES W. K., ORIANIS G. H., HELLER H. C. ET LONDON J., 1994c, Neurones et systèmes nerveux, in *Le Monde du Vivant*, Sciences, Paris, Flammarion, p. 815-869.
- SCHMID A. F., 2004a, Modélisation et interdisciplinarité, in J.-M. LEGAY ET A.-F. SCHMID, *Philosophie de l'interdisciplinarité*, Paris, Éditions Petra, p. 141-146.
- SCHMID A. F., 2004b, Sur le principe de complexité, in J.-M. LEGAY ET A.-F. SCHMID, *Philosophie de l'interdisciplinarité*, Paris, Éditions Petra, p. 223-225.
- VIGNAIS P., 2001, *Les racines du métabolisme cellulaire*, *La Biologie – des origines à nos jours*, Les Ulis, EDP, coll. Grenoble Sciences, p. 301-416.
- WEIL J. H., 2001, Bio-énergétique cellulaire et membranaire, dans *Biochimie Générale*, 9^e édition, Paris, Dunod, p. 146-182.

Chapitre 3

De l'hydrobiologie à l'écologie du paysage*

Vers la fin des années soixante, divers travaux montrèrent que les modifications apportées aux milieux terrestres environnants exerçaient une influence prépondérante sur la dynamique des écosystèmes aquatiques continentaux. Ces travaux amenèrent de nombreux hydrobiologistes à s'interroger sur leurs pratiques de recherche. Il s'avérait en effet impossible de prévoir les évolutions à venir des écosystèmes aquatiques continentaux simplement à partir d'analyses des propriétés physico-chimiques et biologiques des eaux – vitesses de courant, pH, taux d'oxygénation, teneurs en sels nutritifs. Impossible également de prévoir ces évolutions à partir de sites souvent choisis parce qu'ils étaient éloignés des activités humaines et, par suite, considérés comme proches de conditions dites naturelles.

Ces questions ont préoccupé beaucoup de chercheurs vers la même époque, sous l'influence des mêmes articles fondateurs. Elles révélèrent des insuffisances dans la pratique de l'hydrobiologie, avec des conséquences variées, parfois inattendues, sur l'orientation des recherches.

Sous le titre « De l'hydrobiologie à l'écologie du paysage », cet article a plusieurs objectifs : rappeler les origines de l'intérêt des hydrobiologistes pour l'environnement terrestre des milieux aquatiques, illustrer cet intérêt par l'exemple des recherches sur l'eutrophisation des eaux continentales, expliquer comment et pourquoi recourir à l'écologie du paysage, et enfin évoquer les conséquences de ce recours sur les pratiques interdisciplinaires.

ORIGINES DE L'INTÉRÊT DES HYDROBIOLOGISTES POUR L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE DES MILIEUX AQUATIQUES

L'intérêt des hydrobiologistes pour l'environnement terrestre des milieux aquatiques a pour origine deux ensembles de recherches. Un premier ensemble comprend les travaux d'une équipe américaine, groupée autour de Gene Likens, travaux publiés coup sur coup dans *Science* en 1967, en 1968 et en 1969, et dans la foulée dans *Ecological Monographs* en 1970 (Borman *et al.*, 1967, 1968 ; Likens *et al.*, 1969 et 1970). Ces travaux démontrent, à partir d'expériences de déboisement, l'influence

* Chapitre rédigé par Henri DÉCAMPS

majeure du couvert végétal sur les bilans en sels nutritifs de cours d'eau situés dans une forêt expérimentale, à Hubbard Brook, dans le New Hampshire.

Un deuxième ensemble de recherches correspond au programme qui conduisit à modéliser l'eutrophisation des lacs. Les résultats de ce programme furent publiés par Richard Vollenweider, en 1968, dans un rapport technique de l'OCDE, puis validés dans le cadre d'une coopération internationale portant sur plus de 300 lacs. Le modèle ainsi élaboré relie la production de chlorophylle des lacs aux apports en phosphore – apports ponctuels ou diffus – depuis les bassins versants. Quelques années plus tard, en 1975, Noël Hynes développait une conception similaire à propos des eaux courantes, en affirmant que les vallées règlent l'écologie des rivières sous tous les aspects physiques, chimiques et biologiques, depuis les peuplements d'algues jusqu'à ceux de poissons.

32

Ces articles fondateurs engendrèrent d'innombrables travaux. On rappellera simplement ceux du programme sur les grands fleuves français, lancé dès les débuts du Piren (Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement). Le programme « Grands fleuves » avait en effet pour ambition d'inscrire la dynamique écologique de ces fleuves dans le cadre de leur environnement terrestre. Cette ambition, il faut le souligner naquit de la rencontre d'écologues et de géographes. Elle s'appuya sur des recherches conduites à des échelles d'espace très variées : le linéaire de la ripisylve pour la Garonne, une partie de la plaine d'Alsace pour le Rhin, l'ensemble de la vallée pour le Rhône, l'intégralité du bassin drainé pour la Seine et ses affluents. Des échelles variées donc, mais des résultats qui, partout, ont marqué la gestion des écosystèmes fluviaux et engagé à une approche interdisciplinaire de l'écologie des eaux courantes.

L'EXEMPLE DES RECHERCHES SUR L'EUTROPHISATION DES EAUX CONTINENTALES

Les recherches sur l'eutrophisation des eaux continentales illustrent peut-être le mieux « la longue marche des hydrobiologistes », du moins de certains d'entre eux, pour s'intéresser à la façon dont l'utilisation des terres affecte l'écologie des lacs et des rivières.

À la fin des années soixante, il était clair qu'une corrélation existait entre les apports de phosphore à un lac et la biomasse des algues du phytoplancton de ce lac, cette biomasse étant mesurée par la teneur des eaux en chlorophylle. Et le modèle de Vollenweider permettait donc de prédire cette teneur en chlorophylle connaissant les apports de phosphore, la profondeur moyenne du lac, et son temps de rétention hydraulique. Un modèle somme toute assez simple, basé sur de la chimie, de la morphologie et de l'hydrologie.

On s'aperçut vite que ce modèle n'expliquait pas tout. Par exemple, il n'expliquait pas pourquoi il y avait une telle dispersion des points quand on représentait les lacs en fonction des apports en phosphore et des teneurs en chlorophylle, une telle dispersion de part et d'autre de la droite de régression (Capblancq et Décamps, 2002). Pour expliquer cette dispersion, il a fallu revenir à la biologie des peuple-

ments et à la structure des chaînes trophiques, mettre le doigt sur l'effet de cascade par lequel la taille de grands poissons piscivores (comme les brochets) détermine les structures des tailles des poissons planctonophages plus petits (comme les vairons), structures qui déterminent celles du zooplancton (daphnies et autres crustacés), pour se répercuter sur le broutage qu'exerce ce zooplancton sur les algues du phytoplancton : plus précisément sur le taux de ce broutage et sur la sélection des espèces broutées.

Il a fallu comprendre aussi que les daphnies, par exemple, subissent, en plus d'une pression *top-down* de la prédation, une influence *bottom-up* des algues, bactéries et autres éléments du seston dont elles se nourrissent, en particulier du rapport carbone/azote de cette nourriture.

Et il a fallu comprendre pourquoi l'équilibre d'un lac pouvait changer brusquement, passer soudainement d'un statut de lac oligotrophe à un statut de lac eutrophe, ou inversement. Et alors, préciser l'influence de la séquestration du phosphore dans les sédiments et de son largage, le tout orchestré par les peuplements benthiques du fond du lac. S'apercevoir aussi de l'influence de l'hétérogénéité du milieu lacustre, avec des zones littorales complexes : les diverticules des réservoirs par exemple qui épousent étroitement les courbes de niveau, et qui servent de refuges à certains poissons, modifiant les rapports réciproques entre les proies et prédateurs.

Au total 50 années d'efforts à un niveau international, pour envisager les causes possibles, pour examiner les hypothèses, relever les données, suivre les dynamiques les plus longues et parvenir, finalement, à une compréhension approfondie, sophistiquée, du processus d'eutrophisation des eaux continentales (Carpenter, 2002). Une compréhension qui a pesé lourd par exemple dans la bataille de l'interdiction des phosphates dans les lessives, ou dans celle du traitement des eaux usées dans les stations de rejets urbains et industriels. Et pourtant, une compréhension incapable de régler le problème des apports diffus en phosphore et en azote aux milieux aquatiques. Car ici interviennent, en plus, les usages des terres des bassins versants et, plus encore, les usagers de ces terres (Carpenter *et al.*, 1999).

Aussi assiste-t-on, depuis les années soixante-dix, à un afflux d'articles montrant que la mosaïque paysagère influence les concentrations en nutriments des eaux des lacs et des rivières. Tantôt on mesure les apports venant des terrains agricoles, forestiers ou urbanisés. Tantôt on analyse comment s'étendent et se distribuent les surfaces d'où proviennent le phosphore et l'azote. Tantôt on nous apprend que les différentes parties de tel bassin versant contribuent différemment aux apports diffus, que cette contribution varie selon les saisons et les années, souvent en fonction de la pluviosité, que telle ou telle zone riveraine, que tel couvert végétal peut filtrer les apports diffus... Tout cela relève de l'organisation des espaces qui environnent les eaux continentales, une question traitée par ce qu'on appelle, depuis une vingtaine d'années, l'écologie du paysage.

POURQUOI RECOURIR À L'ÉCOLOGIE DU PAYSAGE ?

L'écologie du paysage voit en effet l'espace comme une mosaïque d'éléments juxtaposés, imbriqués, interconnectés. Elle étudie comment ces éléments s'organisent les uns par rapport aux autres, pour quelles raisons, et avec quelles conséquences. Elle dénombre par exemple les éléments de la mosaïque, mesure leur étendue, leur forme, leur connectivité. En fait, l'écologie du paysage considère explicitement les causes et les conséquences de l'hétérogénéité spatiale, avec trois repères majeurs : premièrement, la façon dont les éléments d'une mosaïque paysagère s'organisent dans l'espace influence au premier chef le fonctionnement écologique de l'ensemble ; deuxièmement, les échelles, spatiales et temporelles, auxquelles on se place pour étudier ces conséquences modifient les résultats escomptés ; troisièmement, les organismes vivants et leurs assemblages répondent différemment et de manière rarement linéaire aux variations de la mosaïque paysagère.

34

Quant aux questions, il s'agit de savoir, par exemple :

- si la fragmentation de l'habitat d'une espèce lui permet de développer des populations durables ;
- si les alentours d'un site donné (son contexte) affectent la dynamique du peuplement de ce site ;
- si telle disposition de la mosaïque paysagère modifie le transfert des nutriments dans un bassin versant ;
- si tel régime de perturbation est compatible avec la durée à long terme de tel système écologique.

En somme, l'écologie du paysage rappelle que l'hétérogénéité règne, que l'échelle importe, que les effets de l'hétérogénéité et de l'échelle varient selon les organismes et les écosystèmes considérés. Ses outils lui permettent d'analyser les structures spatiales comme jamais auparavant, et ses modèles, d'envisager les conséquences de ces structures dans les scénarios les plus variés, avec l'utilisation croissante, par exemple, des systèmes d'information géographiques.

Car l'écologie du paysage est née d'une promesse d'union entre l'approche fonctionnelle des écologues et l'approche spatiale des géographes. Les premiers centrés sur le fonctionnement d'écosystèmes considérés comme des unités homogènes, quasiment abstraites, échangeant des flux de matière et d'énergie avec un environnement indifférencié. Les seconds s'attachant à l'étude de la structure hétérogène de la surface terrestre, à diverses échelles, et décrivant comment ces structures changent sous l'effet des modes d'utilisation des terres. On comprend aisément que, face aux problèmes posés par l'aménagement de l'espace, de grands espoirs aient été placés sur l'union de ces deux approches, union susceptible *a priori* de faire comprendre comment fonctionnent ces systèmes hétérogènes, qu'on a qualifié de « paysages ».

Pour beaucoup, il y avait d'ailleurs urgence, particulièrement en certains pays comme la Hollande dont le territoire est densément peuplé, intensément utilisé. Un territoire sous stress, presque expérimental, avec une intrication d'unités paysagères vouées les unes à la production agricole, les autres à la conservation, à l'habitation,

aux loisirs... Et une écologie du paysage qui s'y est définie comme une *problem-solving science* (Vos et Opdam, 1993).

Cet espoir de résoudre les problèmes d'environnement grâce à une « perspective paysagère » se répand au point de susciter ouvrages et rencontres internationales, notamment dans le domaine des eaux courantes (Tockner *et al.*, 2002 ; Naiman *et al.*, 2005). Mais il reste encore à l'écologie du paysage à faire ses preuves. Les travaux se réclamant de cette discipline ne trouvent pas assez d'écho dans le domaine de la planification et de l'aménagement ; un fossé sépare encore les recherches sur l'écologie des paysages et l'aménagement de ces paysages, que ces derniers soient « terrestres » ou « aquatiques ».

PRATIQUES INTERDISCIPLINAIRES

En fait, la promesse d'union entre les deux branches maîtresses de l'écologie du paysage – l'écologie et la géographie – tarde à se réaliser. Sans doute parce que ces disciplines ne sont pas inertes et qu'il est difficile d'intégrer en continu les processus d'acquisition des connaissances qui les caractérisent. Sans doute aussi parce que les paysages ne sont pas inertes non plus : ils évoluent dans un contexte fluctuant de valeurs définies par la société et par l'usage que cette société fait de ses territoires. Pourtant, toute utilisation pratique de l'écologie du paysage repose sur l'intégration des approches de l'écologie et de la géographie (Opdam *et al.*, 2002).

Cette intégration est en effet absolument nécessaire. Pour autant, elle n'est pas suffisante. Il faut encore élargir le cercle, multiplier les échanges avec les sciences de l'homme et de la société. L'écologie du paysage ne peut en effet faire impasse sur la double signification de la notion de paysage : naturelle d'une part et culturelle, symbolique, sensible d'autre part (Décamps, 2001). Elle ne peut faire cette impasse, particulièrement quand il s'agit de planifier et d'aménager. Elle doit alors s'ouvrir à d'autres conceptions des rapports qu'entretiennent l'homme et la société avec l'environnement, imaginer des liens avec l'histoire, avec l'anthropologie, avec l'économie, la sociologie, la philosophie, les sciences politiques... et se soucier de droit, d'éthique, de morale (Nassauer, 1997).

Quel peut donc être le rôle de l'écologie du paysage dans cette constellation de disciplines qui, de près ou de loin, touchent au paysage ? Au paysage dont plus personne n'ignore qu'il est à la fois naturel et culturel. Ce rôle n'est pas d'englober ; il est plutôt de s'insérer sans se diluer.

S'insérer, ce qui demande un effort en direction des paysagistes, des économistes, des sociologues, des politiques... pour expliquer, pour clarifier ce que l'écologie entend par des notions telles que celles de complexité et de diversité, d'intégrité et de santé, de perturbation et d'équilibre, d'incertitude et de surprise.

Mais s'insérer sans se diluer, ce qui demande un effort pour s'en tenir strictement à une approche scientifique des structures spatiales et des interrelations entre les éléments de ces structures. Autrement dit, faire vivre ce qui constitue l'originalité de l'écologie du paysage : son souci de l'hétérogénéité, de l'échelle, de la diversité

avec laquelle les organismes et leurs assemblages répondent aux variations de l'environnement (Décamps et Décamps, 2004).

Ce double effort est une condition de crédibilité. C'est aussi la condition d'un passage utile des frontières disciplinaires pour « poser des questions culturelles scientifiquement informées et poser des questions scientifiques culturellement informées » (Nassauer, 1997).

Finalement, l'histoire des recherches sur l'eutrophisation le confirme : il y aura toujours des limites à la capacité de prévision de l'écologie. En déplaçant les recherches sur l'eutrophisation du domaine de l'hydrobiologie à celui de l'écologie du paysage, on fait peut être reculer certaines de ces limites, mais pas toutes, et pas complètement. Le mérite de ce déplacement est autre. Il est de se convaincre, si nécessaire, qu'aucune solution ne peut être trouvée à un tel problème sans faire appel aux sciences de l'homme et de la société.

Dans cette perspective, l'écologie du paysage dispose aujourd'hui des concepts et des méthodes nécessaires pour comprendre les causes et les conséquences de l'hétérogénéité spatiale, pour identifier les échelles d'espace et de temps appropriées à cette compréhension et pour jeter des ponts entre les sciences de la nature et les sciences de l'homme et de la société.

Elle tire sa force de son approche des relations entre les structures spatiales et les processus écologiques (Turner, 1989 ; Wiens, 1999). Mais cette approche ne prend toute sa signification que dans une confrontation avec d'autres points de vue sur le paysage, y compris avec les points de vue de disciplines plus engagées dans la conception et dans la planification des paysages à venir (Johnson et Hill, 2002) et y compris avec les points de vue de ceux à qui appartient le paysage (Beuret, 2002) : ceux qui l'habitent, ceux qui le produisent ou le transforment, ceux qui le regardent, ceux qui possèdent les terres... et les eaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEURET J. E., 2002, À qui appartient le paysage ? *Natures Sciences Sociétés*, 10, p. 47-53.
- BORMANN F. H., LIKENS G. E., 1967, Nutrient cycling, *Science*, 155, p. 424-429.
- BORMANN F. H., LIKENS G. E., FISHER D. W., PIERCE R. S., 1968, Nutrient loss accelerated by clear-cutting of a forest ecosystem, *Science*, 159, p. 882-884.
- CAPBLANCQ J., DÉCAMP, H., 2002, L'eutrophisation des eaux continentales : questions à propos d'un processus complexe, *Natures Sciences Sociétés*, 10, p. 6-17.
- CARPENTER S., 2002, Ecological futures: building an ecology of the long now, *Ecology*, 83, p. 2069-2083.
- CARPENTER S., BROCK W., HANSON P., 1999, Ecological and social dynamics in simple models of ecosystem management, *Conservation Ecology*, 3, 4
[online] URL : <http://www.consecol.org/vol3/iss2/art4> (1-02-2006).
- DÉCAMP H., 2001, How a riparian landscape finds form and comes alive, *Landscape and Urban Planning*, 57, p. 169-175.
- DÉCAMP H., DÉCAMP O., 2004, *Au Printemps des Paysages*, Paris, Buchet Chastel, 238 p.

- HYNES H. B. N., 1975, The stream and its valley, *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 19, p. 1-15.
- JOHNSON B. R., HILL K., 2002, Introduction: toward landscape realism, in JOHNSON, B. R., HILL, K. (eds), *Ecology and Design*, Washington, Island Press, p. 1-26.
- LIKENS G. E., BORMAN, F. H., JOHNSON, N. M., 1969, Nitrification: importance to nutrient losses from a cutover forested ecosystem, *Science*, 163, p. 1205-1206.
- LIKENS G. E., BORMAN F. H., JOHNSON N. M., FISHER D. W., PIERCE R. S., 1970, Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed-ecosystem, *Ecological Monographs*, 40, p. 23-47.
- NAIMAN R. J., DÉCAMPS H., MCCLAIN, M., 2005, *Riparia: Ecology, Conservation, and Management of Streamside Communities*, San Diego, Elsevier Academic Press, 440 p.
- NASSAUER J. I. (ed), 1997, *Placing nature. Culture and Landscape Ecology*, Washington, Island Press, 180 p.
- OPDA P., FOPPEN, R., VOS C., 2002, Bridging the gap between ecology and spatial planning in landscape ecology, *Landscape Ecology*, 16, p. 767-779.
- TOCKNER K., WARD J. V., KOLLMAN, J., EDWARDS, P. J. (eds), 2002, Special issue: riverine landscapes, *Freshwater Biology*, 47, 907 p.
- TURNER, M. G., 1989, Landscape ecology: the effect of pattern on process, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 20, p. 171-197.
- VOLLENWEIDER R. A., 1968, The scientific basis of lake eutrophication, with particular reference to phosphorus and nitrogen as eutrophication factors, *Tech. Rep. D.A.S./C.S.J./68.27*, OCDE, Paris, 159 p.
- VOS C. C., OPDAM P. (eds). 1993, *Landscape ecology of a stressed environment*, London, Chapman & Hall, 310 p.
- WIENS J. A., 1999, The science and practice of landscape ecology, in KLOPATEK, J. M., GARDNER, R. H. (eds), *Landscape ecological analysis. Issues and applications*, New York, Springer-Verlag, p. 317-383.

Chapitre 4

La médecine de la reproduction : une médecine et des recherches inter- et pluridisciplinaires*

Dans une large conception du terme, la médecine de la reproduction correspond à tous les secteurs médicaux concernés par la prévention de la stérilité et des maladies sexuellement transmissibles, par le traitement de la stérilité ou la mise en œuvre de ses palliatifs, par la prise en charge de l'évolution de la grossesse jusqu'à l'accouchement inclus et par la mise au point et l'application des méthodes de contraception. La stérilité, ou infertilité, peut être définie, dans une première approche, comme l'impossibilité pour un couple, ou un individu, d'obtenir une grossesse.

La recherche en médecine de la reproduction s'appuie depuis toujours sur les méthodes et les résultats de la recherche chez l'animal, mais, à un moment ou à un autre, elle doit être entreprise chez des êtres humains. Elle obéit, ou doit obéir, à des impératifs qui sont propres à la médecine, tels que l'obligation de ne pas nuire aux patients, de les informer des objectifs et des méthodes et de leur assurer, si possible, un bénéfice. D'autre part, elle s'exerce dans deux domaines, traditionnellement considérés comme distincts, qualifiés de recherche clinique et de recherche fondamentale, mobilisant des acteurs de formations différentes et dont le dialogue n'est pas toujours aisé.

LES ANNÉES SOIXANTE

Les connaissances scientifiques dans le domaine de la stérilité sont rudimentaires et ses traitements empiriques. La stérilité est, le plus souvent, considérée comme le handicap d'un individu plutôt que d'un couple donné. Sa prise en charge concerne de préférence la femme traditionnellement estimée porteuse de l'anomalie. Depuis l'Antiquité, la responsabilité masculine n'est retenue qu'en cas d'impuissance, au reste culturellement difficilement avouable. La médecine de la reproduction, telle qu'entendue plus haut, implique des praticiens dont les activités sont rarement coordonnées : les gynécologues-obstétriciens qui traitent les maladies et les malformations de l'appareil génital féminin et contrôlent grossesses et accouchements ; les urologues, spécialistes de l'appareil uro-génital masculin ; les endocrinologues qui tentent d'évaluer et de corriger les insuffisances ou les excès de sécrétion des hormones sexuelles ; les dermato-vénérologues, spécialistes des maladies sexuellement

* Chapitre rédigé par Jean-Claude CZYBA

transmissibles ; les pédiatres qui s'intéressent aux troubles de la puberté. Certains d'entre eux travaillent en collaboration avec des radiologues fournisseurs d'une imagerie médicale réduite à la classique radiographie. En dehors des biochimistes qui interviennent dans la mise en évidence et le dosage des hormones sexuelles, le rôle des biologistes se borne pratiquement à l'établissement éventuel d'un spermogramme dont la réalisation, l'interprétation et les conclusions sont, le plus souvent, peu fiables. Dans certaines facultés de médecine, un enseignement réduit de biologie de la reproduction est assuré par des histo-embryologistes qui utilisent essentiellement les connaissances acquises chez l'animal et effectuent leurs recherches chez les mammifères.

Aux États-Unis, pendant les années soixante, la contraception hormonale (inhibition de l'ovulation) est mise au point à partir de recherches chez les mammifères de laboratoire suivies d'une large expérimentation sur des Portoricaines non informées. Il faut noter qu'à cette époque la contraception est, en France, interdite par la loi.

Bien que le rapport sexuel soit toujours nécessairement associé à la reproduction, la sexualité est, par les médecins eux-mêmes, généralement exclue du champ de la médecine, à l'exception de ses pathologies les plus graves, ou les plus spectaculaires, qui concernent psychiatres et médecins légistes. L'impuissance masculine, qui ne fait l'objet d'aucune recherche, est « traitée » par les urologues, les psychologues et les psychanalystes, sans résultats notables ; elle suscite un commerce lucratif dont la liste des produits magiques et inefficaces est établie depuis des millénaires. La sexualité féminine, réputée honteuse, ne mérite aucune attention. Il faut cependant remarquer que l'exercice de la sexualité reproductrice met en jeu, chez l'homme et la femme, un ensemble d'organes et des structures nerveuses dont l'étude devrait relever de la physiologie, au même titre que les autres fonctions de l'organisme.

LES ANNÉES SOIXANTE-DIX

Un progrès notable des connaissances sur la physiologie de la fertilité s'amorce. La stérilité masculine liée à des anomalies du nombre et de la mobilité des spermatozoïdes commence à être reconnue. Les traitements de la stérilité restant décevants, on assiste au développement de méthodes palliatives visant, dans les cas d'infertilité masculine, à obtenir des grossesses à partir de sperme de donneurs. La pratique de l'insémination artificielle avec sperme provenant de donneurs et conservé par congélation dans l'azote liquide (IAD) entraîne la création de « banques de sperme » dans une vingtaine de CHU français et l'arrivée à l'hôpital des biologistes de la reproduction (histo-embryologistes pour la plupart) auparavant sans rapports directs avec la clinique humaine. On assiste alors à la naissance d'une Spermologie, rapidement interdisciplinaire. Le biologiste de la reproduction, en tant que responsable de la banque de sperme, assure le recueil du sperme, son analyse cytologique, sa congélation, sa conservation et sa distribution aux gynécologues chargés de pratiquer les inséminations. Il est amené à collaborer avec des biochimistes (biochimie du liquide séminal), des immunologistes, des bactériologistes (infections du

sperme), des vétérinaires exercés aux techniques de la congélation du sperme, des biologistes des populations intéressés par l'hétérogénéité et les comportements des dizaines de millions de spermatozoïdes qui peuplent l'éjaculat, des ingénieurs biomédicaux pour la mise au point et la construction d'appareils d'observation, d'analyse et de cryo-conservation du sperme, des psychologues apportant leur soutien à des couples engagés dans un mode de reproduction « artificiel ».

La demande de recours à l'IAD est rapidement importante et les modalités de sa pratique réalisent les conditions d'une étude scientifique, jusqu'alors impossible, des paramètres de la conception : qualité du sperme, date exacte de l'insémination par rapport à celle de l'ovulation... L'intervention des épidémiologistes de l'Inserm, vivement intéressés par la nature et l'abondance des données recueillies, aboutit à l'émergence d'une épidémiologie de la fertilité. On découvre alors que la stérilité n'est, le plus souvent, pour un couple donné, qu'une hypofertilité associant les déficiences des deux partenaires et exprimable en termes de probabilité d'obtenir une grossesse par cycle et de délai moyen nécessaire pour aboutir à une conception. Se dégage alors clairement la notion de couple en tant qu'unité fonctionnelle de la reproduction, notion peu familière au médecin éduqué à considérer le malade en tant qu'individu.

Avec la spermiologie naît l'andrologie, spécialité non reconnue, pourtant symétrique de la gynécologie, qui associe d'emblée urologues, endocrinologues, biologistes, sexologues et quelques gynécologues concernés par l'infertilité du couple. L'andrologie s'intéresse non seulement à l'infertilité masculine, traditionnellement méconnue, mais aussi à la sexualité masculine, traditionnellement mieux considérée que la sexualité féminine.

Les pédiatres sont concernés par la physiologie du développement et par les mécanismes et perturbations de la puberté. Leur collaboration avec les endocrinologues ne présente aucune difficulté, leurs rapports s'établissant surtout par l'intermédiaire d'échantillons sanguins dont le prélèvement est une prérogative médicale que nul ne cherche à contester. Les pédiatres sont très demandeurs d'une collaboration avec les spermiologues lorsqu'il s'agit d'évaluer la mise en route pubertaire de la production des spermatozoïdes ; cette collaboration s'est révélée impossible dans la mesure où l'échantillon à analyser est représenté ici par le sperme qui ne peut être obtenu que par l'éjaculation consécutive à une masturbation. Dans notre expérience, nous n'avons pas rencontré de pédiatre ne craignant pas d'informer les parents d'adolescents de la nécessité du recours à cette méthode de prélèvement. Il faut noter que l'exploration chirurgicale des appareils génitaux de la fille et du garçon ne suscite pas de réticence particulière.

On ne peut passer sous silence le début de l'agitation des médias et de l'opinion publique, provoquée par le bouleversement des représentations que suscitent la pratique de l'IAD et les nouvelles possibilités offertes par la conservation du sperme congelé pendant une durée pratiquement illimitée. L'Assistance médicale à la procréation (AMP), ainsi qu'on l'a appelée plus tard, est à l'origine de la bioéthique impliquant sociologues, philosophes, politiques, juristes et religieux.

À LA FIN DES ANNÉES SOIXANTE-DIX

Un siècle après l'observation des phénomènes cytologiques de la fécondation chez l'Oursin, est réalisée la première fécondation *in vitro* humaine (FIV) suivie du transfert de l'œuf fécondé dans l'utérus, de l'obtention d'une grossesse et de la naissance d'un enfant. Il n'est pas sans intérêt de rappeler que les premières tentatives de FIV réussies ont été réalisées par un physiologiste non médecin, associé à une équipe de biochimistes, également non médecins, et à un gynécologue chargé de ponctionner les ovocytes dans les follicules ovariens et d'introduire l'œuf dans l'utérus après quelques jours de développement *in vitro*. L'indication majeure est représentée par l'obstruction des trompes utérines, le plus souvent non reperméabilisables chirurgicalement. Dans les années quatre-vingt, des milliers de couples ont recours à cette nouvelle AMP. Les modalités de la FIV ont permis une accélération des progrès dans les connaissances de la physiologie de la fertilité féminine et provoqué une collaboration encore plus étroite et mieux coordonnée des spécialités déjà concernées par la spermologie et l'IAD. L'imagerie médicale prend une place de plus en plus grande dans l'exploration des appareils génitaux et dans la réalisation même de la FIV, grâce en particulier à l'échographie de plus en plus performante. La médecine de la reproduction commence à se dégager de l'ensemble des disciplines médicales, en particulier dans un secteur original appelé périconceptologie qui s'intéresse à la production des gamètes, aux modalités de leur rencontre, à la fécondation, à l'évolution de l'œuf fécondé, à son implantation dans la paroi utérine une semaine après la fécondation. Le biologiste de la reproduction occupe une place centrale dans ce secteur ; à ses activités de spermologie s'ajoutent la pratique de la FIV au laboratoire et la cryoconservation des embryons surnuméraires (régulièrement obtenus en raison de l'hyperstimulation de l'ovulation provoquée préalablement au recueil oocytaire par ponction ovarienne). En 1984, la biologie de la reproduction est officiellement reconnue comme l'une des disciplines médicales des CHU. En 1988, en France, une loi définit les compétences des intervenants impliqués dans l'AMP (gynéco-obstétriciens et biologistes) et le cadre juridique de leurs pratiques. Notons que cette même loi interdit toute recherche sur l'embryon humain (terme qui s'applique, plus ou moins heureusement, à tous les stades du développement de l'œuf à partir de la fécondation).

LES ANNÉES QUATRE-VINGT

La congélation des œufs fécondés *in vitro* qui rend possible leur transfert ultérieur dans l'utérus est réalisée. Ce résultat implique la participation de cryobiologistes dont les recherches visent également à obtenir la congélation des ovocytes non fécondés, beaucoup plus délicate que celle des embryons.

Les progrès des méthodes de stimulation de l'ovulation préalables à la FIV mobilisent les chercheurs de l'industrie pharmaceutique qui inventent et synthétisent des hormones artificielles. La production de ces hormones alimente un marché extrêmement lucratif qui concerne également le traitement des femmes qui présentent des troubles de l'ovulation.

LES ANNÉES QUATRE-VINGT-DIX

C'est à ce moment-là qu'est mise au point l'ICSI : FIV par injection directe d'un spermatozoïde dans l'ovocyte. Cette méthode s'est rapidement révélée comme susceptible de régler le problème de la plupart des stérilités masculines pour lesquelles n'existe toujours pas de traitement médical ou chirurgical. La nécessité, dans de nombreux cas, d'obtenir des spermatozoïdes par ponction testiculaire a fait entrer les urologues dans le cercle des praticiens soumis à agrément ministériel pour la pratique de l'AMP.

La possibilité de congeler le sperme pour éventuelle insémination artificielle après plusieurs années de conservation avait intéressé les cancérologues soucieux de préserver par ce biais la fertilité des patients survivant à des chimio ou radiothérapies le plus souvent stérilisantes. Pratiquées depuis 1970, les congélations du sperme réalisées au début des traitements ne laissent persister que peu de spermatozoïdes efficaces pour une insémination artificielle. En revanche, grâce à l'ICSI qui n'utilise qu'un seul spermatozoïde de nombreuses grossesses sont obtenues. La collaboration entre biologistes de la reproduction et cancérologues a conduit également ces derniers à mettre au point des traitements moins nocifs pour la fertilité.

La possibilité de détecter, dans les cellules de l'œuf fécondé, la présence de gènes défectueux responsables de malformations ou de graves maladies congénitales (DPI : Diagnostic préimplantatoire), fait intervenir généticiens et biomolécularistes parmi les acteurs de la périconceptologie. Cette pratique permet de choisir, dans une cohorte d'œufs fécondés lors d'une FIV, ceux qui ne sont pas porteurs du gène défectueux. Il faut noter qu'il ne s'agit pas ici de « manipulation génétique » puisqu'il n'est actuellement pas possible d'envisager la réparation des défauts génétiques.

Les techniques de micromanipulation mises en jeu dans l'ICSI permettent l'obtention de cellules embryonnaires génétiquement identiques à celles de l'œuf qui sera transféré dans l'utérus. Leur culture *in vitro* et leur cryoconservation constitueraient un stock de cellules ultérieurement différenciables en tissus susceptibles d'être utilisés, en cas de besoin, pour une greffe chez l'individu issu de l'embryon d'origine. Cette pratique, interdite par la loi, est considérée par les thérapeutes comme une alternative possible à l'utilisation de cellules souches ponctionnées dans le cordon ombilical.

La transmission du Sida et de l'hépatite C par le sperme mobilise les virologues pour la détection des virus dans le liquide séminal.

La mise en évidence d'une dégradation de certains paramètres du spermogramme au cours des dernières décennies appelle l'attention sur d'éventuelles causes relevant de l'écologie et amène les spermiologues à collaborer avec les chercheurs des sciences de l'environnement.

Les premiers succès du clonage chez la brebis, grâce à l'obtention d'embryons évolutifs issus de la fusion *in vitro* d'un ovocyte anucléé et du noyau diploïde d'une cellule somatique, sont à l'origine d'une remise en cause de nos connaissances sur les phénomènes cytologiques de la fécondation et d'une vaste interrogation sur les possibles applications humaines. Le clonage humain, formellement interdit par la

loi en France, offre la perspective de la naissance d'un enfant génétiquement identique à l'individu parental.

C'est au cours des années quatre-vingt-dix qu'émerge une sexologie réellement scientifique qui étudie les réactions sexuelles avec des méthodes et des moyens qui sont ceux de la recherche dans les différents domaines de la physiologie et de la physiopathologie du corps humain. L'invention du viagra est un exemple intéressant de collaboration interdisciplinaire inattendue. Ce produit de synthèse a d'abord été l'objet d'une expérimentation clinique en cardiologie. Les résultats décevants ont fait abandonner l'idée de son utilisation thérapeutique dans ce domaine, mais les patients volontaires soumis aux premiers essais ont fait état d'une amélioration surprenante de leurs capacités d'érection. Cette constatation est à l'origine d'études qui font grandement progresser la connaissance des mécanismes tissulaires de l'érection et de leurs perturbations ; leur application dans le traitement de l'impuissance connaît un grand succès populaire et, par voie de conséquence, une forte implication des chercheurs de l'industrie pharmaceutique pour la création et la synthèse de nouveaux produits.

Depuis quelques années, en mettant en jeu une imagerie médicale de plus en plus sophistiquée, les ressources de la neuro-endocrinologie et l'exploration électrophysiologique du tissu nerveux, les neurologues étudient la participation des différentes zones du cerveau à des réactions sexuelles considérées jusqu'alors comme relevant du seul domaine de la psychologie.

L'AN 2000

La sous-section du Conseil national des universités « Biologie du développement et de la reproduction » devient plus largement pluridisciplinaire avec l'intitulé « Biologie et médecine du développement et de la reproduction » afin d'associer plus étroitement les enseignants-chercheurs, biologistes et cliniciens particulièrement concernés par cette nouvelle spécialisation et dont les formations initiales sont diverses (histologistes, cytologistes, biochimistes, gynécologues, pédiatres, généticiens...).

La médecine et la biologie de la reproduction sont, par leurs objets et par leur histoire particulière, pluridisciplinaires. Leur pratique a dû, et doit encore, affronter des difficultés de divers ordres. L'enseignement médical considère l'individu comme unité fonctionnelle et ne prépare pas à se représenter le couple comme unité de procréation ; traditionnellement, tout ce qui concerne l'appareil génital féminin est du domaine de la gynécologie obstétrique et l'appareil génital masculin relève de l'urologie. La nécessaire concertation n'est pas toujours aisée. Les formations des biologistes et des cliniciens diffèrent sensiblement et leurs méthodes de raisonnement ne sont pas toujours immédiatement compatibles, ce qui complique souvent la conduite de recherches communes. On a vu plus haut que les représentations de la sexualité, y compris chez les médecins, peuvent interférer de façon négative dans la démarche scientifique. Néanmoins, au cours des dernières décennies on a pu assister à une évolution qui permet actuellement la production d'abondantes publications pluridisciplinaires dans le domaine de la reproduction humaine.

Chapitre 5

Émergence d'un concept.

Un itinéraire entre agronomie et géographie*

Ce travail de recherche, visant à construire des entités spatiales significatives pour l'agriculture, a été entrepris par deux chercheurs, l'un agronome, l'autre géographe. Il n'est pas aisé d'en préciser l'origine car il n'y a pas eu au départ de formalisation concrète d'un projet mais plutôt rencontre de deux préoccupations voisines. C'est progressivement, dans la proximité quotidienne d'une unité de recherche (Laboratoire système agraire et développement de l'Inra à Versailles, organiquement constitué de diverses disciplines) que ces préoccupations ont pris la forme d'une question partagée et d'un travail en commun.

NAISSANCE D'UNE QUESTION

La préoccupation de l'agronome se fondait sur une insatisfaction croissante face aux unités spatiales couramment prises en compte dans l'analyse agronomique, à savoir la parcelle de culture c'est-à-dire l'unité spatiale dans laquelle est mis en œuvre un itinéraire technique (succession ordonnée d'opérations techniques réalisées sur une culture au cours d'une campagne). Cette unité, la parcelle, était progressivement incluse dans le territoire de l'exploitation agricole, dans la perspective d'analyse systémique des logiques sous-jacentes aux pratiques agricoles de production. L'insatisfaction provenait de la difficulté, dans ces conditions, de prendre en compte, dans une portion de territoire continue locale, voire d'étendue plus grande, les interactions entre exploitations et entre celles-ci et les activités autres qu'agricoles. Face à cette difficulté la démarche envisagée par l'agronome était de type agrégative ; elle visait à déceler, par l'analyse du paysage, une entité spatiale locale pertinente supérieure à la parcelle de culture.

Le géographe, intéressé par la description et l'interprétation de distributions dans l'espace, avait le souci de distinguer, dans de vastes territoires, des portions d'espaces présentant des caractéristiques voisines en termes d'usages et d'aménagements agricoles. Interpellé par les fonctionnements et les dynamiques de l'agriculture, sa démarche initiale, différente de celle de l'agronome, était la partition de territoires étendus en unités spatiales pertinentes pour ce secteur d'activité.

* *Chapitre rédigé par Jean-Pierre DEFFONTAINES et Pascal THINON*

La question commune qui s'est peu à peu dégagée des fréquents échanges était la suivante : peut-on délimiter des unités agronomiques dans une petite région agricole dans lesquelles on puisse utiliser, adapter, voire compléter, les concepts et les méthodes du diagnostic agronomique et qui permettent une analyse fonctionnelle de l'agriculture plus fine que celle réalisable dans les partitions diverses du territoire proposées par les géographes ? Cette question est la clé de l'itinéraire commun qui s'est déroulé de 1997 à 2002.

Elle s'est avérée d'autant plus d'actualité que l'agriculture, appelée à remplir de façon plus explicite que par le passé d'autres fonctions que celle de production de biens alimentaires, était confrontée à de nouveaux territoires. En effet, les fonctions de protection de la qualité de biens collectifs comme l'air et l'eau, de préservation de la biodiversité et des paysages notamment, mettent en cause des processus qui se déroulent dans le cadre d'espaces spécifiques. Par exemple, la qualité de l'eau dépend des activités humaines dans un bassin versant, dans l'aire d'alimentation d'une source ou d'un captage. La multifonctionnalité de l'agriculture rendait nécessaire la recherche d'une mise en correspondance d'espaces fonctionnels de l'agriculture avec les espaces à enjeux environnementaux et paysagers.

La conjoncture agricole apportait une certaine légitimité sociale à la question initiale posée, mais elle n'en était pas l'origine.

DES PROPOSITIONS DE PARTITION DE L'ESPACE DANS LES DEUX DISCIPLINES

Les géographes sont nombreux à avoir proposé des unités spatiales en référence au paysage et ce à des échelles diverses. On peut citer les géofacies (Bertrand, 1968, p. 249-272), les sylvofacies (Houzard, 1984), les unités paysagères (Hotyat, 1985, p. 57-58), les facettes paysagères envisagées par divers chercheurs travaillant notamment en Afrique et à Madagascar dans les années soixante-dix et quatre-vingt (Blanc-Pamard, Sautter, 1990, p. 121-125). Ces notions désignent des entités inscrites dans l'espace et dans le temps et visent à prendre en compte une réalité complexe où interagissent nature et société.

Les concepts agronomiques d'opération, de séquence et d'itinéraire techniques, de succession de cultures, d'arrière effets, de composantes du rendement... s'appliquent à l'échelle de la parcelle d'usage agricole. Celui de système de culture pose un problème particulier du fait de ces divers usages. Pour les agronomes des façons de produire, il est utilisé au niveau de l'exploitation agricole pour désigner l'ensemble cohérent des pratiques appliquées en fonction d'objectifs de production et de transformation du milieu ; l'exploitant pouvant mettre en œuvre un ou plusieurs systèmes de cultures dans son exploitation. Mais cette définition peut s'appliquer à d'autres échelles, notamment au niveau local. Récemment, des agronomes ont proposé la notion de système de cultures local (Papy, 2001, p. 139-149). Divers concepts élaborés par les géographes ruraux ont été repris par les agronomes pour introduire dans l'analyse agronomique les dimensions territoriales et collectives. C'est le cas de « l'assolement » pour une approche fonctionnelle de l'occupation

agricole au niveau du territoire de l'exploitation mais aussi d'un finage. Le terme polysémique de « terroir » est utilisé par les agronomes pour désigner un territoire présentant des caractères particuliers du milieu physique. C'est le cas également de l'expression « système agraire » qui, pendant une période, a été largement empruntée par des agronomes aux géographes mais qui, insuffisamment théorisée, a subi un retrait. De même l'analyse du paysage a été utilisée par certains comme complément de l'analyse agronomique locale.

LES UNITÉS AGROPHYSIONOMIQUES ET LES UNITÉS AGRONOMIQUES

L'agronome utilisait l'analyse du paysage pour comprendre la situation et le fonctionnement d'agricultures locales. Considérant le paysage comme un ensemble d'objets agencés dans l'espace résultant des aménagements et des pratiques mis en œuvre, il repérait, dans des contextes divers, des unités physionomiques dans lesquelles les marques de l'activité agricole actuelle et passée présentaient une relative égale apparence. Elles étaient dénommées Unités agrophysionomiques (UAP). On peut sans doute rattacher la notion d'UAP à celle de facette paysagère des géographes mais, dans le cas des UAP, seuls interviennent les éléments du paysage agricole. Cet acquis empirique, utilisant une approche agronomique du paysage, interpellait le géographe. Celui-ci recherchait une interprétation théorique à ces unités fondées sur l'apparence des faits agricoles. Il introduisait la théorie des champs géographiques (Brunet, Ferras, Thery, 1992, p. 91-92). Dans celle-ci tout point de l'espace géographique se trouve placé dans un ensemble de champs qui ont eu une influence ou qui influent aujourd'hui sur une gamme possible d'usages de ce lieu, compte tenu de l'environnement social, technique ou économique. Le géographe proposait de distinguer plusieurs champs utiles à la compréhension des répartitions dans l'espace des usages agricoles. Dans l'activité agricole les champs qui « jouent le plus » sont le milieu naturel (relief, sol, climat), les distances (distance des parcelles au siège, des exploitations aux entreprises agro-alimentaires, distance à la ville...), les statuts fonciers, les réglementations de la politique agricole, les filières économiques...

La combinaison de ces champs définit des entités spatiales caractérisées par une relative égale organisation spatiale des usages agricoles. Elles étaient appelées Unités agronomiques (UA). L'agronome et le géographe faisaient l'hypothèse d'une assez bonne correspondance entre les UA et les UAP.

LE SYSTÈME DE CULTURES, UN CONCEPT INTÉGRATEUR ENTRE FONCTIONNEMENT ET FORMES VISIBLES

Dans une portion de territoire les systèmes de cultures, tels qu'ils sont définis précédemment, ne se répartissent pas de façon aléatoire. Selon leur sensibilité à tel ou tel champ géographique, ils se regroupent et se combinent de façon particulière pour constituer les UA.

Une UA peut être constituée d'un système de culture unique comme un système à base de betterave ou de maïs. Plus fréquemment, plusieurs systèmes de cultures se combinent créant une structure particulière du territoire agricole. La relative égale organisation spatiale des usages agricoles dans les UA provient d'une histoire foncière, de la proximité des sièges d'exploitations ou d'une agglomération, de la présence d'une aire de protection, d'un milieu physique particulier...

Par ailleurs, à chaque système de cultures, on peut faire correspondre un ensemble de formes visibles particulières. La disposition, non aléatoire, des systèmes de culture dans le territoire induit une organisation des formes produites par chaque système de culture en motifs. La répétition d'un motif ou une combinaison récurrente de motifs définit les UAP. Une réflexion s'engageait sur la permanence et la non-permanence des formes visibles produites par l'agriculture et sur les processus de leur genèse.

48

On distinguait deux familles de formes selon leurs caractères plus ou moins durables. Une première famille de formes relativement stables résulte de la mise en place dans le territoire des dispositifs, c'est-à-dire des aménagements finalisés par des fonctions comme celles de la délimitation, de la mise en défens, de l'accès, de la protection, de la maîtrise de l'eau, du stockage des récoltes... Une autre famille de formes, plus fluctuantes, dont la durée très variable ne dépasse pas le temps d'une campagne, résulte des opérations techniques, c'est-à-dire des actions concrètes que les agriculteurs et les éleveurs exercent quotidiennement dans le cadre de leur activité de production. Ces deux familles de formes s'observent à divers niveaux où s'organise l'activité agricole, au niveau de la parcelle et de l'exploitation, mais également au niveau d'une portion de territoire. Nous prenions conscience que, dans un territoire, les systèmes de culture s'organisent en unités agronomiques (UA), mais aussi qu'ils produisent un ensemble de formes visibles qui définissent les unités agrophysionomiques (UAP). Le concept de système de culture permettait de confirmer notre hypothèse de la correspondance entre les deux unités spatiales. Cette confirmation était importante car, pour la construction des UAP, il était justifié de procéder soit par l'analyse visuelle, soit par une approche par les champs géographiques. L'expérience montrait que les deux approches se complètent utilement.

Il n'y a pas d'échelle spatiale unique des UA ; on peut distinguer des UA de grande dimension sur de vastes territoires, mais également des petites unités au niveau local. La dimension des UA est fonction du problème soulevé, des indicateurs retenus, des moyens d'évaluation et de l'étendue à couvrir. Prendre en compte des étendues géographiques de taille régionale, n'était pas compatible avec l'approche fondée sur l'analyse au sol du paysage pour déterminer les UAP. Il fallait définir et expérimenter de nouveaux outils d'analyse visuelle du territoire. Les travaux menés dans le Vexin français (Thinon *et al.*, 1996) et dans l'ensemble du Pays Basque (Hubert, 1998) ont permis de mettre à l'épreuve l'utilisation de couvertures photographiques aériennes. Par ailleurs, l'outillage de la géomatique, issue en France de la discipline géographique, était introduit pour rechercher les correspondances entre divers champs géographiques et entre ceux-ci et les unités de relative

égale apparence. De plus, les capacités graphiques de tels outils, facilitaient la construction progressive et itérative de la cartographie des UAP.

Face à ce changement d'échelle s'engageait une réflexion sur la pertinence et la limite de l'analyse agronomique aux petites échelles.

DISCUSSION

L'expérience concerne une cellule élémentaire de l'interdiscipline puisqu'il s'agit de deux chercheurs, un agronome et un géographe.

Il faut remarquer que les deux chercheurs sont au départ assez proches de la frontière entre les deux disciplines. Les proximités portent sur une curiosité semblable envers la distribution d'objets dans l'espace géographique, sur le postulat de l'importance des relations entre l'espace géographique et les acteurs. Pour le géographe, la proximité tient également à son insertion au sein d'un institut comme l'Inra alors que, pour l'agronome, elle viendrait plutôt d'une prise de distance par rapport aux objets de recherche agronomique traités couramment au sein de l'Institut.

Face aux interrogations de part et d'autre, chacun est amené, sans injonctions et dans le quotidien, à faire à l'autre un état de l'art de sa discipline. Chacun, sans cahier des charges, est en quelque sorte *passer de frontières* pour l'autre (pour reprendre l'intitulé d'un ouvrage dirigé par Marcel Jollivet en 1992). Il y a construction commune et échange de concepts, par exemple le système de culture et le champ géographique. Il y a un apport réciproque de méthodes, par exemple l'analyse agronomique du paysage et les approches géomatiques. Il y a également, chemin faisant, émergence de questions qui peuvent apparaître comme déstabilisantes pour les disciplines. Pour l'agronome qui a cheminé de la parcelle au local, il n'est pas facile de raisonner aux petites échelles. Les champs géographiques introduisent des variables qui lui sont peu familières, juridiques, institutionnelles par exemple. Il y a également la découverte de l'efficacité des SIG et simultanément la constatation de l'absolue nécessité de l'analyse de terrain.

Pour le géographe, insatisfait des approches parfois trop « spatialistes » de sa discipline, l'accès aux logiques des acteurs par l'intermédiaire d'une analyse fine des fonctionnements techniques et des pratiques agricoles permet de lier structures et dynamiques spatiales aux logiques et pratiques d'acteurs. Elle concerne aussi les nouveaux sens donnés aux formes visibles produites par l'activité agricole.

À aucun moment il n'y a eu intention réfléchie d'interdiscipline ; il n'y a pas eu d'intervention ou de pression institutionnelle sur la cohabitation, pas d'exigence d'analyse épistémologique de cette interdiscipline. Il y a, dans une phase initiale essentielle, une question construite en commun et partagée, puis des étapes de terrain et des controverses vécues au quotidien et dans la durée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BERTRAND G., 1968, Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique, *Revue Géogr. des Pyrénées et du Sud-Ouest*, n° 3, p. 249-272.

- BLANC-PAMARD C., SAUTTER G., 1990, Facettes, in *Paysages, Aménagement, Cadres de vie. Mélanges offerts à Gabriel Rougerie*, Paris, AFG, p. 121-126.
- BRUNET R., FERRAS B., THERY H., 1992, *Les mots de la géographie. Dictionnaire critique*, Paris, Reclus-La Documentation Française, 470 p.
- HOTYAT M., 1985, *Étude du couvert forestier par les images landsat : bilan et évaluation sur la forêt domaniale de Fontainebleau*, Reims, Trav. Inst. Géogr.
- HOUZARD G., 1984, Aménagement et évolution des forêts : l'exemple d'Ecouves, *Revue Géogr. des Pyrénées et du Sud-Ouest*, T. 55.
- HUBERT B. (dir.), 1998, *Politiques innovantes et pérennisation de l'agropastoralisme au Pays Basque*, Prog. Leader II, Rapport INRA-SAD, T. I : 43 p., T. II : 194 p.
- JOLLIVET M. (dir.), 1992, *Sciences de la nature, sciences de la société - Les passeurs de frontières*, Paris, éditions du CNRS.
- PAPY F., 2001, *Pour une théorie du ménage des champs : l'agronomie des territoires*, C. R. de l'Académie d'Agriculture de France, 87, n° 4, p. 139-149 ; colloque Olivier de Serres, Le Pradel, sept. 2000.
- THINON P. et al., 1996, *Relations Territoires, Agriculture et Urbanisation. Recherche d'unités de gestion territoriale. Le cas du Vexin français*, Versailles, INRA-SAD, 77 p.

Chapitre 6

Des schistosomes aux autres parasites tropicaux : un espace de dialogue interdisciplinaire*

INTRODUCTION

Les parasites dont le cycle biologique se déroule dans les régions tropicales constituent toujours, en ce début du XXI^e siècle, une cause importante de morbidité et de mortalité pour une grande partie de l'humanité. Paradoxalement, si les humains de la préhistoire avaient probablement autant à craindre des prédateurs que des parasites, nos contemporains n'ont plus rien à craindre – ou presque – de leurs ennemis « de grande taille »¹, mais le danger que représentent les virus, les bactéries, les parasites uni- ou pluricellulaires demeure présent dans de vastes régions du monde.

En dehors de la zone intertropicale, ce même danger est présent mais il cause bien moins de dommages. Il existe au moins deux raisons à cela; la première est que les pathogènes potentiels sont moins nombreux dans les régions tempérées que dans les régions tropicales, simplement parce que la biodiversité globale y est plus faible; la seconde est que les progrès de la médecine, qu'il s'agisse des vaccinations ou des traitements thérapeutiques, sont devenus la règle en zone tempérée et trop souvent l'exception dans les pays pauvres « du Sud ». À ces deux raisons fondamentales, il faut ajouter les différences dans la qualité de l'éducation, de l'habitat et de l'hygiène. Le résultat est que, dans les pays riches, les maladies infectieuses et parasitaires sont le plus souvent à l'état épidémique et rapidement maîtrisées (à quelques exceptions notables près, il est vrai), tandis qu'elles sont nombreuses et sévissent à l'état endémique dans les pays pauvres.

Cette brève comparaison suffit à elle seule pour montrer que ce n'est pas un facteur unique, mais toute une série de facteurs complexes qui expliquent les différences « Nord-Sud » et déterminent localement l'état de santé des populations humaines. Il est facile d'en déduire que la lutte contre les parasitoses (au sens large) dans le Tiers Monde ne peut être efficace que si elle procède d'une approche pluridisciplinaire, prenant en compte le plus grand nombre possible de facteurs impliqués.

* *Chapitre rédigé par Claude COMBES*

1. Les humains eux-mêmes étant supposés exclus...

LES BASES ÉCOLOGIQUES DE L'INFECTION PARASITAIRE

Pour qu'une infection parasitaire se développe chez un individu-hôte quelconque, il faut qu'il y ait tout d'abord rencontre entre le stade infestant du pathogène et sa victime, puis compatibilité entre eux pendant la phase qui correspond à la maladie. Notons que le concept de compatibilité n'implique pas ici que la cohabitation soit harmonieuse ; bien au contraire elle dissimule un conflit, dans lequel l'hôte tente de se débarrasser de l'intrus par le biais de ses mécanismes de défense tandis que le parasite s'efforce de survivre dans le milieu hostile ainsi créé.

Pratiquement, ce diptyque « rencontre-compatibilité » peut être représenté par deux « filtres », qui permettent de visualiser les forces qui caractérisent l'affrontement entre le parasite et son hôte (Combes, 2001a ; 2001b). Les « filtres » peuvent être définis comme des phénotypes virtuels croisés :

- « phénotypes » parce que le degré d'ouverture des filtres est déterminé par l'expression de gènes ;
- « virtuels » parce qu'il s'agit bien évidemment d'une image ;
- « croisés » parce que l'état du filtre à un moment donné dépend à la fois du génome du parasite et de celui de son hôte.

52

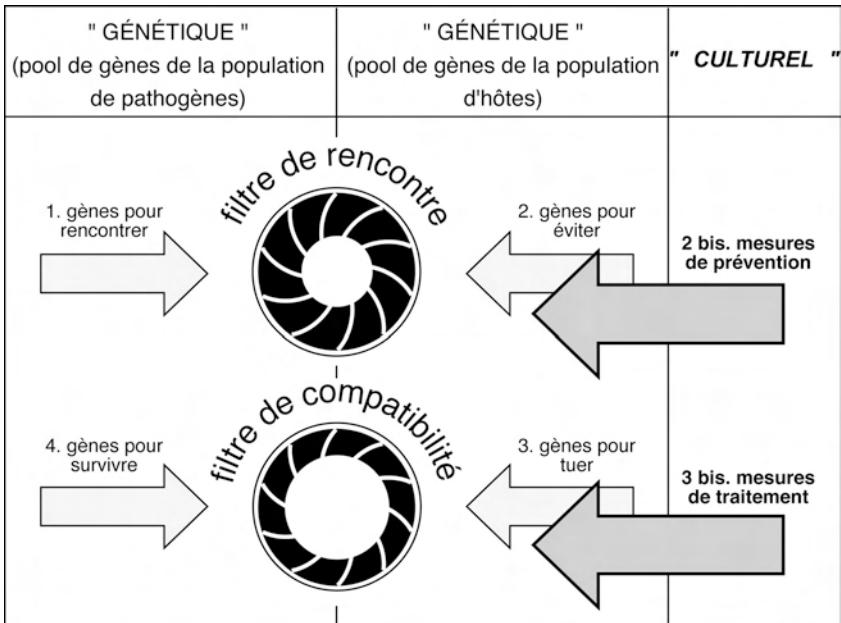


Figure 1. La symbolique des filtres de rencontre et de compatibilité (d'après Combes, 2001b, modifié).

La figure 1 montre comment le symbole des filtres peut être utilisé pour schématiser les pressions sélectives qui s'exercent sur les pathogènes et leurs hôtes. Une approche logique simple permet de comprendre qu'il se produit :

- une sélection de gènes (1) pour rencontrer dans les populations de parasites (ce qui signifie que toute mutation augmentant la probabilité de rencontre avec les hôtes convenables est sélectionnée positivement) ;
- une sélection de gènes (2) pour éviter dans les populations d'hôtes (ce qui signifie que toute mutation diminuant la probabilité de rencontre avec les stades infestants est sélectionnée positivement) ;
- une sélection de gènes (3) pour tuer dans les populations d'hôtes (ce qui signifie que toute mutation permettant de détruire les parasites si la rencontre a eu lieu est sélectionnée positivement) ;
- une sélection de gènes (4) pour survivre dans les populations de parasites (ce qui signifie que toute mutation permettant aux parasites de survivre dans le milieu hostile créé par l'hôte est sélectionnée positivement)².

Il va de soi que cette approche de base est soumise à toutes sortes de retouches de détail lorsqu'un système parasite-hôte particulier est considéré. La retouche la plus importante est liée au fait que, chez certains parasites, la sélection de gènes pour rencontrer et de gènes pour survivre est corrigée par des rétroactions négatives, en ce sens que des parasites qui deviendraient trop abondants et/ou trop virulents peuvent être contre-sélectionnés.

LA RENCONTRE AVEC LES AGENTS INFESTANTS

Les actions que peuvent mener les écologues dans les zones d'endémies ont pour objectif de contribuer à la fermeture du filtre de rencontre, tandis que ce qui concerne le filtre de compatibilité est l'affaire des personnels de santé au sens strict (pour autant, il n'est pas acceptable – nous le verrons bientôt – que les spécialistes de la rencontre ignorent ceux de la compatibilité et *vice-versa*).

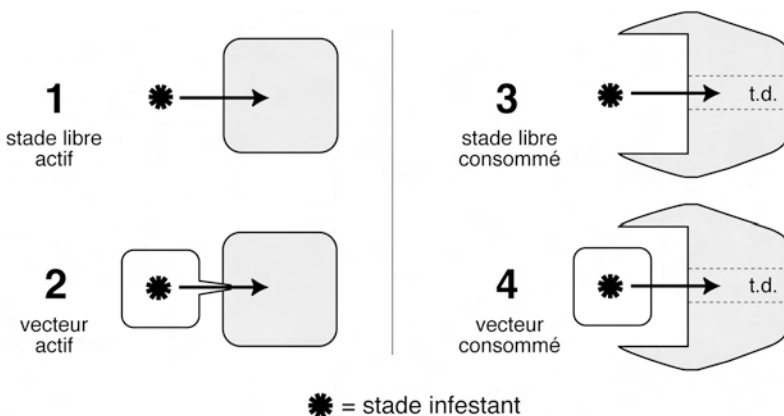


Figure 2. Les quatre modalités principales de l'infestation parasitaire (t.d. : tube digestif).

2. Le mot « mutation » est employé ici dans un sens large, car ce sont le plus souvent des combinaisons d'allèles qui sont soumis à la sélection et non des gènes isolés.

La rencontre avec les agents infestants revêt des modalités très variées dans le monde complexe du parasitisme, comme le montre la figure 2. Celle-ci schématise les quatre processus fondamentaux de la rencontre entre les stades infestants des parasites et leurs hôtes.

Les processus (1) et (2) n'impliquent pas de consommation de la part de l'hôte ; en (1), le stade infestant « s'injecte » lui-même dans l'hôte ; en (2), il est injecté par un vecteur-piqueur (généralement un arthropode).

Les processus (3) et (4) impliquent une consommation par l'hôte ; en (3), le stade infestant est consommé libre ; en (4), le stade infestant se trouve à l'intérieur d'un vecteur (qui varie beaucoup suivant les parasitoses) et c'est ce vecteur qui est consommé.

On peut noter que dans les processus (1) et (2), le parasite arrive dans n'importe quelle partie du corps, alors qu'en (3) et (4), il aboutit en principe dans le tube digestif. Dans les deux cas, le parasite peut effectuer des migrations internes ultérieures³.

Les mesures « anti-rencontre » qui peuvent être envisagées pour limiter l'infestation des populations sont évidemment bien différentes suivant que l'on a affaire à l'un ou l'autre des modes de rencontre.

LA NÉCESSITÉ DU DIALOGUE PLURIDISCIPLINAIRE

La symbolique des filtres et des pressions de sélection qui tendent à les ouvrir ou à les fermer permet de superposer le « culturel » au « génétique ».

Nous entendons par là que le contrôle des maladies parasitaires ne consiste en rien d'autre que de mettre au point des stratégies capables de contribuer à la fermeture des filtres. Schématiquement, fermer le filtre de rencontre se fait par l'éducation, la modification des comportements ou des milieux, la fermeture du filtre de compatibilité se fait par les vaccinations et les traitements thérapeutiques.

La figure 1 montre que le culturel (les flèches sombres) ne fait que venir au secours du génétique (les flèches claires). Elle permet de comprendre aussi pourquoi toute stratégie qui ne ferait pas dialoguer les personnes qui ont pour objectif de peser sur la rencontre et celles qui ont pour objectif de peser sur la compatibilité n'aurait guère de sens. S'il est vrai en effet que la fermeture d'un seul des filtres signifie l'éradication de la maladie, il est tout aussi vrai qu'il s'agit là d'un objectif presque toujours illusoire. Plus concrètement, une diminution de la morbidité a d'autant plus de chances d'être significative et durable qu'une concertation et une planification est instaurée à trois niveaux de responsabilité : entre les spécialistes qui s'attaquent à la rencontre (par exemple entre chercheurs, éducateurs et décideurs), entre les spécialistes qui interviennent sur la compatibilité (c'est-à-dire entre les personnels des diverses professions de la santé) et enfin, entre les spécialistes qui s'attaquent à la rencontre et ceux qui interviennent sur la compatibilité (c'est à dire entre

3. Les transmissions trans-ovariennes propres à certaines bactéries, principalement mutualistes, ne sont pas prises en compte dans ce schéma.

les deux catégories précédentes). Le dernier de ces trois niveaux d'échanges est probablement le plus important.

Il n'est pas aberrant mais au contraire souhaitable que les sociologues dialoguent avec les médecins, les botanistes avec les zoologistes, les épidémiologistes avec les écologues, les modélisateurs avec les expérimentateurs, les chercheurs avec les décideurs. Sans oublier, dans la mesure où les grandes endémies sont toutes tropicales, les ethnologues et les biochimistes, qui peuvent tirer des pharmacopées traditionnelles des molécules efficaces et beaucoup moins coûteuses pour les populations locales que les drogues des pays industriels (*cf.* par exemple Benoit *et al.*, 1996).

Le contrôle des parasitoses tropicales peut se comparer à la défense d'une place-forte au Moyen Âge : les remparts et les flèches que l'on envoie sur les assaillants et leurs chevaux équivalent aux mesures anti-rencontre ; le corps-à-corps si l'ennemi a tout de même pénétré équivaut aux mesures anti-compatibilité (si l'on veut pousser plus loin la comparaison, on peut dire que l'entraînement physique des soldats représente la vaccination). L'image ne saurait, ici encore, illustrer la totalité des processus en cause, mais elle suggère fortement que la défense d'une place-forte ne peut que bénéficier d'une coordination de l'action des archers postés sur les remparts et de celle des fantassins disséminés dans les rues de la ville à défendre.

L'EXEMPLE DE LA SCHISTOSOMOSE

La schistosomose est causée par un métazoaire du groupe des trématodes. Il existe des schistosomes parasites de l'homme (par exemple *Schistosoma mansoni* et *S. haematobium*), des schistosomes parasites de vertébrés divers (par exemple *S. bovis* des ongulés, *S. rodhaini* des rongeurs) et des schistosomes qui parasitent à la fois l'homme et d'autres vertébrés (par exemple *S. japonicum*). Des genres voisins se trouvent chez les oiseaux et même les crocodiles (*cf.* Combes, 1993). Les parasites adultes, dont la taille peut dépasser le centimètre chez certaines espèces, vivent dans les vaisseaux sanguins du vertébré. Curieusement, ils se présentent en couples, le mâle portant en permanence sa femelle dans un repli de sa face ventrale. Les schistosomes consomment du sang (plusieurs millions de globules rouges par couple et par 24 h).

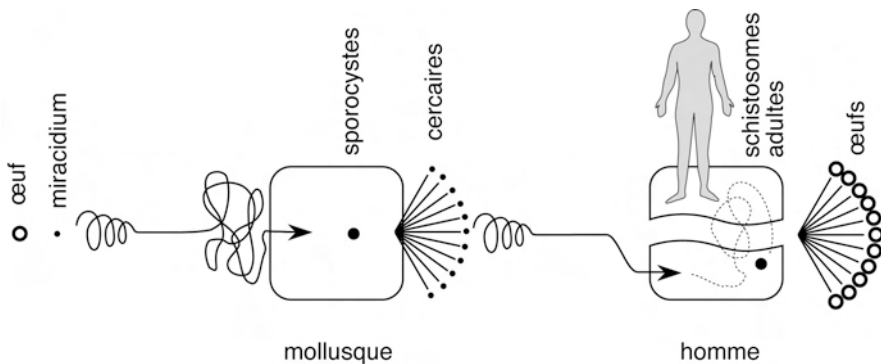


Figure 3. Représentation schématique du cycle biologique des schistosomes.

La femelle pond chaque jour des centaines, voire des milliers d'œufs, au voisinage d'une « porte de sortie » (suivant les espèces, la paroi de l'intestin, celle de la vessie, ou celle des sinus). Les œufs, après avoir franchi la paroi des vaisseaux sanguins et celle de l'organe, continuent leur évolution s'ils tombent dans l'eau (figure 3). Ils y donnent naissance à une petite larve, le miracidium, qui n'a que quelques heures de vie pour trouver un mollusque gastéropode aquatique et y pénétrer. Chaque espèce de schistosome ne peut se développer que dans une seule espèce de mollusque (ou quelquefois un petit nombre d'espèces apparentées).

À l'intérieur du mollusque, une multiplication, dans laquelle certains voient un processus de bouturage et d'autres une parthénogenèse⁴, met en jeu un stade sporocyste (avec plusieurs générations) qui donne naissance au bout d'environ trois semaines à des petites larves, les cercaires, qui émergent des mollusques. Un seul mollusque peut produire jusqu'à 1 000 cercaires par jour pendant plusieurs mois. Un unique miracidium initial peut ainsi voir son génome multiplié par un facteur de 200 à 300 000... Les cercaires nagent à la recherche du vertébré convenable. Lorsqu'elles le rencontrent, il leur suffit de quelques minutes pour traverser la peau (ce type de contamination correspond au cas n° 1 de la figure 2). La cercaire prend alors le nom de schistosomule, et celui-ci gagne l'appareil circulatoire. Après une migration qui les fait notamment passer par le foie, les parasites acquièrent leur maturité sexuelle, s'accouplent et le cycle peut recommencer⁵.

La « lecture » du cycle biologique des schistosomes suggère à elle seule de nombreux points où il est possible d'intervenir pour diminuer l'incidence de la maladie.

Il suffit même de considérer que le cycle, tel une pièce de théâtre, implique trois acteurs strictement obligatoires : le parasite, le mollusque et le vertébré.

Les stades libres du parasite

La lutte contre les stades libres des parasites n'est pas facile. Miracidiums et cercaires sont des larves nageantes minuscules (moins de 1/3 de mm) et il apparaît souvent peu réaliste de s'attaquer directement à eux. Le fait que de nouveaux miracidiums et de nouvelles cercaires émergent chaque jour, les premiers des œufs, les secondes des mollusques, implique en effet un renouvellement fréquent des traitements et par là même un risque de pollution.

Malgré ces difficultés, des recherches sont régulièrement consacrées à l'activité d'extraits de plantes (de Carvalho *et al.*, 1998 ; Rug et Ruppel, 2000). Comme les plantes utilisées proviennent des régions d'endémie schistosomienne, le procédé aurait l'avantage d'être peu coûteux et d'impliquer les populations locales dans la prévention (ce qui est une forme très souhaitable d'interdisciplinarité). Des espoirs ont également été fondés sur l'incorporation de molécules cercaricides dans les savons domestiques utilisés en région d'endémie (Combes et Arnaudis, 1982).

4. Cette question est traitée par Dobrovoskij et Ataev (2003), deux auteurs qui défendent l'hypothèse d'une parthénogenèse, donc d'une authentique alternance de générations dans le cycle des trématodes digènes.

5. Pour davantage de détails sur le cycle des schistosomes ou d'autres maladies parasitaires, voir Mehlhorn (2001).

Les mollusques

Les mollusques constituent une cible qui ne devrait être ignorée dans aucun programme de contrôle des schistosomoses.

Il est possible :

- de modifier le milieu (assèchement de canaux inutilisés par exemple, ou encore destruction de la flore par des herbicides, ce dernier moyen étant évidemment à réserver à des sites de transmission artificiels) ;
- d'utiliser des produits molluscicides (dont certains peuvent être des dérivés de plantes, y compris d'espèces de la région d'endémie, voir Mc Cullough, 1981, 1992) ;
- de tenter une lutte biologique en introduisant (avec beaucoup de précautions bien entendu) des espèces de mollusques compétiteurs ou des pathogènes spécifiques des vecteurs (*cf.* par exemple Pointier et Giboda, 1999 ; El Ouali *et al.*, 1999 ; Pointier et Jourdan, 2000) ;
- d'effectuer, si les conditions le permettent, un véritable ramassage des individus, procédé insolite qui a tout de même été utilisé en Chine avec succès.

L'énumération de ces pistes pour la lutte anti-mollusque montre que des actions aussi différentes ne peuvent être menées que par des personnes de formation différente, travaillant en étroite coopération.

Les humains

Les modalités du cycle des schistosomes conduisent à d'autres pistes, en relation cette fois avec le comportement des humains.

Une *cartographie des sites* (il est possible de filtrer l'eau et d'identifier les cercaires, *cf.* Théron, 1979) peut conduire à une information de la population sur les sites à risque, donc à ne pas fréquenter. *L'éducation des enfants* par l'entremise des instituteurs, voire celle des adultes, peut vulgariser la connaissance du cycle et induire des comportements réduisant la transmission (par exemple ne pas uriner ou déféquer dans l'eau ou dans des endroits exposés à un ruissellement pouvant entraîner les œufs). *La conception de circuits d'adduction d'eau propre* (sans fuites et suintements où le cycle pourrait s'établir) est une composante indispensable de tout programme de lutte. *La thérapeutique* doit jouer un rôle majeur car la pharmacopée dispose de molécules qui sont efficaces (avec des exceptions dans certains foyers) ; les traitements doivent être précédés d'une communication bien conçue avec les habitants (faute de quoi les médicaments risquent de ne pas être pris ou de ne l'être que par une partie de la population) et ne pas consister en un « coup de poing » sans suivi. Lorsqu'il existe des *réservoirs non-humains* (nous avons vu que c'est le cas pour *S. japonicum* qui infeste en Asie toutes sortes de mammifères pourvu qu'ils aient des contacts avec l'eau, et surtout les buffles domestiques), il est illusoire de ne pas tenir compte de ce facteur aggravant puisque les animaux infestés disséminent des œufs du parasite dans le milieu. *Les flux migratoires* des populations humaines doivent être pris en compte, car les transports de parasites d'un foyer à un autre peuvent

avoir pour résultat de rompre les processus d'adaptation locale des parasites (Zhu *et al.*, 2003) et d'augmenter ainsi leur diversité génétique.

Comme on le voit, une régression à long terme d'une endémie telle que la schistosomose se conçoit très difficilement sans une coopération entre tous les acteurs qui peuvent intervenir et apporter chacun leurs compétences dans des disciplines parfois très éloignées (au départ) les unes des autres.

La France a mené dans les années soixante-dix et quatre-vingt aux Antilles l'une des actions les plus intégrées qui aient été organisées dans le monde. Toutes les catégories d'acteurs dont nous venons de parler ont été sollicitées et ont effectué des séjours sur le terrain, principalement en Guadeloupe.

Deux enseignements peuvent être tirés de cette action à long terme. D'une part, l'objectif de réduire la prévalence de la schistosomose humaine (le parasite en cause était *S. mansoni*, agent de la schistosomose dite intestinale) a été atteint. Bien qu'une difficulté insoupçonnée au départ ait été révélée par les recherches, à savoir la participation au cycle des rats noirs sauvages *Rattus rattus*, la maladie a complètement disparu chez l'homme en une dizaine d'années ; rivières et mares de Guadeloupe ne présentent plus aucun danger pour les baignades aujourd'hui. D'autre part, le dialogue interdisciplinaire a fonctionné ; cela ne veut pas dire qu'il ait été facile d'emblée ; les participants se souviennent encore de débats difficiles où la communication passait mal, par exemple entre biologistes et sociologues ; mais, *in fine*, et après des efforts réciproques, chacun avait compris « l'utilité » de l'autre.

D'AUTRES EXEMPLES...

La schistosomose est certainement l'un des meilleurs exemples qui soient pour comprendre la nécessité de l'interdisciplinarité dans le contrôle des grandes endémies, mais ce qui vient d'être dit s'applique, avec de simples variantes, à n'importe quelle autre parasitose.

Le paludisme (en fait, comme dans le cas des schistosomoses, il existe plusieurs paludismes) pose des problèmes particuliers puisque la transmission implique un vecteur-piqueur (contamination de type n° 2 sur la figure 2). Peut-être plus encore que dans le cas précédent, l'effort porte ici sur la lutte anti-vectorielle, c'est-à-dire anti-moustiques. Lorsqu'on réalise que la lutte chimique n'a abouti nulle part en climat tropical à une réduction durable du paludisme, on mesure tout le travail qui reste à faire aux écologues, qu'il s'agisse de modifier ou supprimer les gîtes larvaires naturels, ou d'éviter que les aménagements hydriques ne provoquent la création de nouveaux gîtes. La lutte contre le paludisme est, il est vrai, rendue difficile par les adaptations surprenantes du parasite qui est capable de manipuler à la fois les vecteurs (il diminue le rythme de piqûre tant que le moustique n'est pas infestant et l'augmente dès qu'il peut transmettre la maladie) et les humains (il accroît l'attractivité des humains aussitôt que le sang de ceux-ci véhicule les stades sexués qui doivent être absorbés par les moustiques, *cf.* Lacroix *et al.*, 2005).

La transmission du paludisme est d'ailleurs une occasion de rappeler à quel point les activités humaines peuvent faire le lit des maladies parasitaires. C'est en

faisant appel au rôle des hommes que Mario Coluzzi (1999, 2003) a proposé une hypothèse originale pour expliquer la forte virulence de l'espèce *Plasmodium falciparum*, responsable du paludisme « grave » et qui parasite exclusivement les humains.

Les séquençages d'ADN ont montré que *P. falciparum* possède un proche parent chez les chimpanzés et les gorilles, *P. reichenovi*. La divergence entre *P. reichenovi* et *P. falciparum* daterait de 7 MA, ce qui correspond à la période habituellement retenue (au moins d'après les spécialistes en phylogénie moléculaire) pour la séparation entre les primates non-humains et les hominidés.

Or, la forte pathogénicité de *P. falciparum* est un caractère désavantageux pour le parasite et aurait dû logiquement être « contre-sélectionnée » au cours de ces millions d'années, puisque la mort de l'hôte entraîne l'arrêt de la transmission. Mario Coluzzi pense que la virulence actuelle de *P. falciparum* aurait en fait une origine récente. Pour lui, il y a 6 000 à 8 000 ans, les hommes ont été responsables de deux changements majeurs dans l'écologie d'*Anopheles gambiae*, le plus important moustique vecteur de *P. falciparum*. D'une part, ils ont créé des gîtes de ponte très favorables au moustique par la déforestation ou d'autres procédés agricoles ; d'autre part, ils ont formé des communautés sédentaires, ce qui a entraîné la sélection de l'anthropophilie chez *A. gambiae*, c'est à dire sa spécialisation pour piquer les hommes.

Ces deux changements ont considérablement accru l'ouverture du filtre de rencontre entre *P. falciparum* et les populations humaines, ce qui aurait provoqué une « saturation » de l'infestation chez les humains (les habitants des zones impaludées d'Afrique reçoivent jusqu'à un millier de piqûres infestantes par an). Cette saturation aurait eu pour conséquence un accroissement de la compétition entre génotypes de *P. falciparum*. À son tour, la compétition aurait provoqué l'apparition de la virulence forte que l'on observe aujourd'hui.

Pareille histoire évolutive est l'un des meilleurs arguments pour faire comprendre que les comportements humains et le milieu sont des facteurs clefs des transmissions parasitaires.

La fasciolose (ou distomatose hépato-biliaire), causée par *Fasciola hepatica*, pose des problèmes spécifiques car il s'agit là avant tout d'une maladie du bétail, qui ne passe sur l'homme que dans des conditions particulières d'hygiène ou de pauvreté. Le cycle de ce trématode ressemble dans ses grandes lignes à celui des schistosomes, à ceci près que les cercaires, au lieu de pénétrer activement à travers la peau des vertébrés, s'enkystent sur la végétation dans les lieux humides sous la forme de métacercaires. Souvent, des métacercaires se forment aussi à la surface de l'eau, ou bien sont détachées accidentellement de la végétation ; les stades infestants libres peuvent être ainsi ingérés avec la nourriture ou la boisson. Que la métacercaire soit collée sur des feuilles ou portée par l'eau, on considère habituellement qu'il s'agit là d'un stade non parasite (contamination de type n° 3 sur la figure 2). Alors qu'une cercaire de schistosome doit rencontrer un hôte dans les heures qui suivent sa sortie du mollusque, la métacercaire de *F. hepatica* peut demeurer infestante pendant des semaines ou des mois dans le milieu extérieur.

Après ingestion, le parasite va de l'intestin au foie par migration trans-tissulaire et finit par s'installer dans les canaux biliaires, dont il « broute » la paroi. Dans les pays en voie de développement, la fasciolose humaine est devenue localement un grave fléau au cours des dernières années. C'est le cas par exemple sur les hauts plateaux andins du Pérou, où la pauvreté pousse les enfants à manger de l'herbe ou boire des eaux contaminées, ce qui aboutit à des infestations massives et souvent mortelles. Chercheurs, éducateurs, aménageurs et bien d'autres peuvent intervenir contre la fasciolose, en ciblant leurs actions cette fois-ci vers les comportements associés à la prise de nourriture.

Dans les régions tempérées, la fasciolose sévit aussi chez le bétail et quelques mammifères sauvages tels que lapins et rongeurs. Chez les humains, elle a souvent été expliquée par la consommation de cresson provenant de sites sauvages ou de cressonnières mal entretenues (c'est à dire à la fois habitées par des mollusques vecteurs et polluées par des fecès humaines ou animales). Le problème a été entièrement résolu aujourd'hui pour ce qui est des cressonnières; les rares infestations observées proviennent uniquement de la consommation de cresson ou d'eau non contrôlés.

Des parasitoses très graves comme les amibiases ou les ascaridioses relèvent comme la fasciolose d'un contrôle de la nourriture et/ou de la boisson, puisque la contamination se fait également par ingestion accidentelle de stades infestants libres. Une variante de ce mode d'infestation est constituée par la voie respiratoire: certains virus et bactéries, associés à des aérosols, pénètrent dans l'organisme avec l'air inspiré.

Pour illustrer le type de contamination n° 4 de la figure 2, c'est-à-dire la consommation d'un stade infestant contenu dans un vecteur, les exemples que l'on pourrait citer sont les plus nombreux de tous, surtout chez les trématodes, cestodes et nématodes⁶. Cela d'autant plus que la diversification des « proies » chez les humains les a mis en contact, au cours du dernier million d'années et plus encore à l'époque contemporaine, avec des stades infestants de parasites qui, initialement, ignoraient totalement les primates. Du ver solitaire que l'on contracte en mangeant du bœuf ou du porc, à la paragonimose transmise par des crustacés d'eau douce, la consommation de nourriture mal cuite est dans tous les cas impliquée.

Le cycle de la douve de Chine, *Clonorchis sinensis*, est le plus révélateur de l'importance des comportements humains dans la transmission. Le parasite se développe d'abord, tout comme *Schistosoma* et *Fasciola*, dans un petit escargot des eaux douces ; les cercaires qui s'échappent de l'escargot nagent puis s'enkystent en métacercaires dans la musculature de divers poissons ; les vertébrés piscivores se contaminent en ingérant les muscles des poissons ; les parasites adultes se trouvent dans les canaux biliaires, où ils pondent leurs œufs. L'homme s'intègre au cycle de *C. sinensis* lorsqu'il consomme du poisson mal cuit. Lorsque les parasites sont très nombreux (jusqu'à plusieurs milliers par individu), la maladie peut être mortelle.

6. La manière dont sont apparus les cycles complexes de parasites reste un sujet de réflexion pour les spécialistes de l'évolution. R. Poulin (2003) a publié une synthèse des idées en cours sur cette question.

Un tel cycle suggère toutes sortes de moyens d'influencer le « succès » du parasite chez les humains, depuis la lutte contre les mollusques jusqu'à la thérapeutique. On devine toutefois aisément le rôle qu'une information dirigée vers les populations concernées (cuisson des aliments) peut jouer dans le contrôle de ce type de parasitose.

CONCLUSION

Lorsque les étudiants en parasitologie (ceux des facultés des sciences et de médecine, ceux des écoles vétérinaires) apprennent les modes de transmission des parasites, ils sont déroutés par ce qui leur paraît être une variété infinie et désordonnée. Il est vrai que cette variété est une illustration foisonnante des solutions multiples que la sélection naturelle peut retenir pour répondre à un même problème, ici la contamination de l'hôte. Si les parasites sont peu présents dans l'œuvre de Darwin, c'est uniquement parce que leurs modes de transmission ont été pratiquement inconnus jusque vers la fin du XIX^e siècle. En eut-il été autrement, Darwin aurait certainement puisé bien des arguments dans le parasitisme pour supporter sa vision de l'évolution biologique.

Face à cette diversité des situations, il est paradoxal que les réponses relèvent toutes d'une approche interdisciplinaire. S'il est vrai que les actions concrètes doivent être étroitement adaptées à chaque type de parasite – et secondairement à chaque foyer d'endémie – la lutte doit reposer dans tous les cas sur les mêmes bases conceptuelles.

Au cours des dernières années, l'écologie s'est enrichie de nouveaux concepts comme ceux de « *ecosystem engineer* » (Jones *et al.*, 1994) et de « niche construction » (Laland *et al.*, 2000 ; Odling-Smee *et al.*, 2003). Ces concepts insistent sur l'influence que tous les êtres vivants exercent sur leur environnement. Dans le cas de l'humanité, cette influence constitue une sorte de « troisième hérédité », aux côtés du génétique et du culturel. Lutter contre une parasitose en modifiant le milieu, détruire des vecteurs, procéder à des adductions d'eau, c'est se comporter en ingénieur de l'écosystème avec la finalité d'améliorer la santé des populations humaines; c'est construire une niche, au sens écologique du terme, dans laquelle les agents pathogènes voient leur impact sur la vie des hommes devenir aussi négligeable que l'impact des grands fauves.

Mais lutter contre les parasitoses, principalement en milieu tropical et aussi longtemps que le niveau de vie des hommes y demeurera précaire, c'est aussi se rendre compte que le contrôle de la plupart des parasitoses sera très rarement une victoire définitive. La plupart des agents infectieux et parasitaires ont en effet des ressources génétiques qui leur permettent de répondre à l'intervention humaine. Les taux de mutation, la possibilité dans certains cas d'une accélération de ces taux, les temps de génération courts par rapport à ceux des hôtes sont autant d'armes redoutables qui permettent aux pathogènes de s'adapter. Est-il nécessaire d'insister sur la conclusion que, face à ces armes sans cesse renouvelées, l'interdisciplinarité ne sera jamais un luxe ?

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BENOIT F., VALENTIN A., PÉLISSIER Y., DIAFOUKA F., MARION C., KONE-BAMBA D., MALLIÉ M., YAPO A. & BASTIDE J. M., 1996, Antimalarial activity in vitro of vegetal extracts used in west african traditional medicine, *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 54, p. 67-71.
- COLUZZI M., 1999, The clay feet of the malaria giant and its African roots: hypotheses and inferences about origin, spread and control of *Plasmodium falciparum*, *Parasitologia*, 41, p. 277-283.
- COLUZZI M., 2003, *Plasmodium falciparum* en Afrique subsaharienne. Spéciation récente des vecteurs, transmissibilité, évolution de la pathogénèse / contrôle de la maladie, et capacité vectorielle, in G. MILON (dir.) *Susceptibilité aux maladies infectieuses*, Paris, Elsevier SAS.
- COMBES C. & ARNAUDIS J., 1982, Research on the use of surface active substances in the protection against *Schistosoma cercariae*, *Acta Tropica*, 39, p. 79-84.
- COMBES C., 1993, Les schistosomes, l'eau et l'homme, *Revue du Praticien*, 43, p. 405-415.
- COMBES C., 2001a, *Parasitism. The Ecology and Evolution of Intimate Interactions*, Chicago University Press, USA.
- COMBES C., 2001b, *Les associations du vivant. L'art d'être parasite*, Paris, Flammarion.
- DE CARVALHO R. R., MALDONADO JUNIOR A., OLIVEIRA FILHO E. C., RIBEIRO A. C., PAUMGARTTEN F. J. et REY I., 1998, *Effects of Euphorbia milii latex on Schistosoma mansoni eggs, miracidia and cercariae*, *Memórias Instituto Oswaldo Cruz, Brésil*, 93, suppl. 1, p. 235-237.
- DOBROVOLSKIJ A. A. ET ATAEV G. L., 2003, The nature of reproduction of Trematode Rediae and Sporocysts, in C. COMBES ET J. JOURDANE (dir.) *Taxonomie, écologie et évolution des métazoaires parasites. Livre-hommage à Louis Euzet*, Perpignan, PU de Perpignan, vol. 1, p. 249-272.
- EL OUALI E., GHAMIZI M., MOUAHID A. et MONÉ H., 1999, Croissance et reproduction de *Bulinus truncatus* (*Gastropoda : Planorbidae*) en compétition intraspécifique et interspécifique avec *Melanopsis praemorsa* (*Gastropoda : Melanopsidae*), *Annales de Limnologie*, 35, p. 41-47.
- JONES C. G., LAWTON J. H. & SHACHAK M., 1994, Organisms as ecosystem engineers, *Oikos*, 69, p. 373-386.
- LACROIX R., MUKABANA W. R., GOUAGNA L. C. & KOELLA J. C., 2005, Malaria infection increases attractiveness of humans to mosquitoes, *PLOS Biol.*, 3 (9), e298.
- LALAND K. N., ODLING-SMEE F. J. & FELDMANN M. W., 2000, Niche construction, biological evolution, and cultural change, *Behavioral and Brain Sciences*, 23, p. 131-175.
- MCCULLOUGH F. S., CAYRAL PH., DUNCAN J. et CHRISTIE J. D., 1981, Les molluscicides dans la lutte contre la schistosomiase, *Bulletin of the World Health Organization*, 59, p. 17-32.
- MCCULLOUGH F. S., 1992, The role of mollusciciding in schistosomiasis control, *World Health Organization document, WHO/SCHIST/92*, 107, p. 1-34.
- MEHLHORN H. (éd.), 2001, *Encyclopedic reference for Parasitology*, vol. 2, *Schistosomiasis*, p. 533-547.
- ODLING-SMEE F. J., LALAND K. N. & FELDMAN M. W., 2003, *Niche construction: the neglected process in evolution*, *Monographs in Population Biology*, 37, Princeton University Press, USA.
- POINTIER J.-P. & GIBODA M., 1999, The case for biological control of snail intermediate hosts of *Schistosoma mansoni*, *Parasitology Today*, 15, p. 395-397.
- POINTIER J.-P. & JOURDANE J., 2000, Biological control of the snail hosts of schistosomiasis in areas of low transmission: the exemple of the Caribbean area, *Acta Tropica*, 77, p. 53-60.
- POULIN R., 2003, Helminth life cycles: evolutionary increases and decreases in complexity, in C. COMBES et J. JOURDANE (dir.), *Taxonomie, écologie et évolution des métazoaires parasites. Livre-hommage à Louis Euzet*, PU de Perpignan, Perpignan, vol. 2, p. 167-183.

- RUG M. & RUPPEL A., 2000, Toxic activities of the plant *Jatropha curcas* against intermediate snail hosts and larvae of schistosomes, *Tropical Medicine & International Health*, 5, p. 423-430.
- THÉRON A., 1979, A differential filtration technique for the measurement of schistosome cercarial densities in standing waters, *Bulletin of the World Health Organization*, 57, p. 971-975.
- ZHU Z.Q., XIA M.Y., JOURDANE J. & COMBES C., 2003, Recherches expérimentales sur l'adaptation locale de *Schistosoma japonicum* à son vecteur *Oncomelania hupensis*, in C. COMBES et J. JOURDANE (dir.), *Taxonomie, écologie et évolution des métazoaires parasites. Livre-hommage à Louis Euzet*, PU de Perpignan, Université de Perpignan, vol. 2, p. 365-380.

Chapitre 7

Questions biologiques et jeux complexes de données. Une expérience halieutique*

INTRODUCTION

L'étude de l'exploitation des ressources naturelles renouvelables impose de disposer – et donc de produire – des connaissances sur la ressource et sur sa dynamique sous l'impact de l'exploitation et d'éventuelles autres sources de variabilité. Cela conduit à collecter des données. Ces données font l'objet d'une analyse et d'un traitement résultant en une synthèse contribuant à la réponse aux questions posées, au mieux de l'information qu'elles contiennent.

Lorsque les données disponibles sont issues d'observations de l'activité d'exploitants et des résultats de cette activité, le plan d'expérience qui leur est associé est au moins en partie décidé par les « usagers ». Tel est le cas des jeux de données « de capture et d'effort » dans le domaine halieutique. Ce plan d'expérience (choix des espèces cibles, des méthodes, des lieux de pêche...) peut lui même devenir source de questions et le jeu de données est, en ce sens, complexe. Son analyse peut indiquer que la seule estimation des paramètres « interprétables » des modèles construits pour représenter la dynamique de la ressource n'est plus suffisante pour restituer l'information contenue dans les données. Le recours à des modèles de dynamique conjointe « ressource-exploitation » peut alors s'imposer, en particulier si les questions ainsi soulevées doivent être prises en compte parce qu'elles sont en relation claire avec une finalité affichée. L'application entre ainsi de plein pied dans le domaine de la recherche fondamentale, et ce, d'autant plus, que ces questions finalisées peuvent être difficilement identifiables *a priori* par une discipline scientifique.

Cette situation peut être source d'incertitude dans la mesure où les estimateurs des paramètres peuvent être corrélés, auquel cas les estimations obtenues pour une partie des paramètres dépendent des valeurs données à d'autres. La réponse à certaines questions dépend alors d'hypothèses (réponses), parfois non explicitées, relatives à d'autres questions. Cette situation est caractéristique de l'interdisciplinarité dès lors que les paramètres s'interprètent dans des domaines disciplinaires différents. Elle peut se traduire par l'existence de plusieurs solutions cohérentes entre lesquelles l'analyse des données montre qu'il n'est pas possible de décider.

* Chapitre rédigé par Francis LALOË

Cette situation ne conduit pas à l'abandon des questions initiales, bien au contraire. Si le traitement des données est ambigu (absence de solution unique) le choix d'une solution (ou au moins la réduction du domaine de solutions) implique un retour – avec la collecte de nouvelles données – aux questions initiales dans le domaine disciplinaire relatif à la ressource et dans d'autres domaines. Quel que soit le domaine disciplinaire, ses propres questions trouvent ainsi une seconde légitimité « externe ».

L'apport de l'interdisciplinarité est d'autant plus riche que les questions de chaque point de vue disciplinaire sont explicitement posées dans ce contexte de double légitimité. Cela impose une articulation concrétisée par un modèle de dynamique conjointe dont le besoin a pu être identifié lors de l'analyse de données. Dès lors qu'elles ont été collectées selon un protocole raisonné, ces données sont un « fait » et leur traitement constitue un impératif d'ordre déontologique : la synthèse constituant le résultat du traitement de ces données peut et doit être utilisée pour contribuer aux réponses aux questions soulevées par leur analyse.

66

QUESTIONS BIOLOGIQUES

Dans des programmes de recherche relatifs à l'exploitation des ressources vivantes, les questions relevant des sciences de la vie portent légitimement sur la ressource exploitée. La ressource peut être définie de multiples manières. Il peut s'agir, dans le cadre de l'halieutique, d'une population caractérisée par une quantité, effectif ou biomasse, ou bien par plusieurs quantités, classes d'âge ou groupe de classes d'âge. Il peut s'agir – et c'est ce qu'on observe avec les recherches relatives à la « gestion écosystémique des pêches » – de plusieurs populations d'une ou plusieurs espèces en interactions entre elles et avec leur environnement...

Une fois une définition adoptée, la ressource est décrite par une variable Y de dimension cohérente avec cette définition (dimension 1 s'il s'agit de l'effectif ou de la biomasse d'une population, supérieure à 1 si on distingue des classes d'âge et/ou si on considère plusieurs populations...). Au temps t , cette variable Y_t (ou plus exactement l'espérance $E(Y_t)$ de la distribution dont elle est une réalisation) est fonction de son état passé y_{t-} , de l'activité d'exploitation représentée par une variable a_t de dimension au moins égale à 1 et de l'environnement représenté par une variable z_t également de dimension au moins égale à 1. Cela conduit à considérer une équation :

$$E(Y_t) = f_{\theta}(y_{t-}, a_t, z_t) \quad (1)$$

Dans cette équation a_t et z_t sont des arguments de la fonction f_{θ} avec ses paramètres θ . Leur définition doit être en cohérence avec celle de la ressource. Ainsi peut-on constater que la dimension de a est généralement égale à celle de Y . Si Y est de dimension 1 (effectif ou biomasse d'une population), a est un prélèvement ou un taux de prélèvement. Si plusieurs populations sont distinguées, l'activité sera

présentée selon autant de prélèvements ou taux de prélèvement¹... Évidemment, si on part d'un questionnement relatif à l'activité, il n'y a pas de raison *a priori* pour que la dimension de la variable A_t décrivant l'activité en cohérence avec la définition adoptée pour cette dernière soit la même que celle de l'argument a_t de la fonction $f_\theta(y_t, a_t, z_t)$. Ceci est sans importance s'il est possible de « connaître » le plus exactement possible la valeur prise par a_t à chaque temps t . Il est en effet probable que la description A_t de l'activité selon une définition de cette dernière soit plus riche – et donc de plus grande dimension – que la description a_t qui a pour seul objet de permettre de caractériser son impact sur la ressource. Plusieurs activités différentes peuvent engendrer le même impact et leurs différences peuvent être négligées dans le cadre de l'utilisation de l'équation (1). Elles doivent même l'être par soucis de parcimonie.

JEUX COMPLEXES DE DONNÉES

Les données collectées doivent en premier lieu permettre de décrire Y et a au cours du temps dans l'équation (1). Ensuite, pour la série chronologique « observée » des couples (Y_t, a_t) , il s'agit de rechercher les valeurs θ_{est} , estimations des paramètres θ , qui optimisent un critère de ressemblance entre la série observée Y_t et la série ajustée produite par l'application de l'équation (1). Ce critère peut être, comme dans le cas de la régression usuelle, une somme de carrés d'écart entre valeurs observées et ajustées qui doit être aussi faible que possible (par ex. : Pella et Tomlinson, 1969).

L'étude des ressources halieutiques est caractérisée par une grande difficulté d'observation directe de la ressource. Si on peut faire l'hypothèse de constance (éventuellement à un coefficient de saisonnalité près) de la probabilité qu'une unité de biomasse d'une population a d'être capturée par la mise en œuvre d'une action de pêche d'un type donné, alors l'évolution dans le temps des captures par action reflète celle de l'abondance de cette population. Dans le vocabulaire halieutique, cette probabilité correspond à une *capturabilité*.

Il est alors naturel de regrouper les actions de pêche affectant la ressource étudiée selon des types, classes de la relation d'équivalence fondée sur l'identité des capturabilités à l'encontre de chacune des composantes de la ressource. Les actions d'un même type forment alors une strate dans le cadre d'un protocole d'échantillonnage. Pour un système d'exploitation d'une ressource donnée, on peut définir J strates, chacune d'effectif f_{jt} au temps t . Dans ces conditions le traitement des données, en cohérence avec le protocole de collecte (Laloë, 1985), permet de répondre aux deux premières questions posées relatives au suivi de Y et de a au cours du temps :

- l'évolution des rendements (captures par action) rend compte de celle des abondances des diverses composantes de la ressource ;
- l'argument a_t représentant l'activité de pêche afin de décrire son impact au temps t de l'exploitation sur la ressource est une fonction des effectifs des strates, pondérés

1. C'est, par exemple, le cas de modèles actuellement en plein développement et d'usage très répandu, tels qu'Eco-path et Ecosim (Polovina, 1984 ; Christensen et Pauly, 1992 ; Walters, Christensen et Pauly, 1999).

par les capturabilités correspondantes. On a², pour une composante i de la ressource :

$$a_{it} = \sum_j q_{ijt} f_{jt} \quad (2)$$

L'estimation des valeurs θ_{est} du paramètre θ et l'étude critique de la qualité de l'ajustement (à partir des résidus, écarts entre valeurs ajustées et observées) permettent de « valider » l'équation (1) et de proposer un diagnostic de l'état de la ressource. Ces opérations seront d'autant plus satisfaisantes que les valeurs prises par l'argument a_t sont précisément estimées (en tant que variables explicatives au sein d'un modèle, linéaire ou non, elles devraient être en théorie exactement connues).

Cela impose deux conditions : les effectifs f_{jt} des strates doivent être connus et les strates doivent être homogènes (toutes les actions sont bien caractérisées par les mêmes capturabilités).

Ces conditions peuvent être plus ou moins facilement satisfaites selon la nature des pratiques des unités d'exploitation (unités de pêche).

Les unités de pêche peuvent avoir ou non le choix entre plusieurs types d'actions (au sens donné ci-dessus). Si elles disposent d'un tel choix, elles décident alors de la strate dont relève leur action. Elles décident donc des effectifs des strates qui sont à ce titre variables, imposant une estimation plus minutieuse à chaque pas de temps et donc un effort d'échantillonnage pouvant devenir hors de portée. Si elles ne disposent pas d'un tel choix, les actions qu'elles entreprennent relèvent toujours de la même strate. Les effectifs des strates sont beaucoup plus stables et d'estimation plus aisée. Si ce problème n'est pas bien identifié et que chaque unité de pêche est supposée – à tort – toujours entreprendre des actions du même type, l'effectif des strates redevient stable, mais elles ne sont plus homogènes en terme d'impact. L'argument a_t ne peut plus être correctement estimé.

Le plan d'expérience dont les données sont issues est au moins en partie décidé par les pêcheurs (choix des espèces cibles, des méthodes, des lieux de pêche...). Ce plan peut lui-même être source de questions et le jeu de donnée est à ce titre complexe. Son traitement doit donc être précédé d'une analyse. Si la « difficulté » décrite dans le paragraphe précédent est identifiée lors de cette analyse, il devient légitime, pour répondre aux questions posées sur la ressource et sa dynamique, de privilégier la collecte de données d'activité et de résultats auprès d'unités de pêche dont le comportement rend mieux estimables les paramètres identifiés dans le contexte de l'équation (1).

QUESTIONS DE « GESTION »

La qualité des connaissances produites dans le contexte de l'équation (1) en termes de capacité de gestion est également liée à la satisfaction des conditions présentées plus haut.

2. Il est possible de tenir compte des capacités individuelles des unités de pêche dans ces formulations (Laurec, 1979).

Les connaissances auxquelles contribue le traitement des données sont utilisées à des fins de « gestion rationnelle » de la ressource. Cette utilisation est revendiquée dans la présentation des programmes de recherche et une validation des modèles construits et utilisés pour traiter les données collectées comporte une évaluation de l'apport des connaissances ainsi produites en termes d'amélioration des capacités de gestion. Ces modèles sont donc aussi des instruments (Legay, 1997) en vue de mieux atteindre cet objectif.

On peut, en fonction d'un objectif donné, considérer quelles décisions permettent de l'atteindre. Il faut définir cet objectif et identifier les variables de contrôle sur lesquelles peuvent porter les décisions.

Dans le contexte de l'équation (1) les objectifs identifiables portent naturellement sur l'état de la ressource (un état « optimal » correspondant à une valeur donnée de Y , ou bien un état considéré selon divers points de vue possibles comme acceptable ou viable). Des contraintes de nature économique ou encore relatives à l'ampleur des modifications pouvant être décidées peuvent également être imposées sur l'activité (par exemple Béné *et al.*, 2001). Mais, quelles que soient les décisions prises et les variables de contrôle sur lesquelles elles peuvent directement porter, leurs conséquences sur l'état de la ressource sont décrites au travers de la fonction donnée dans l'équation (1). Les décisions doivent donc porter directement sur a_t , ou au moins permettre une évaluation précise des valeurs a_t qu'elles engendrent.

En d'autres termes, pour une valeur donnée des variables de contrôle, a_t ne doit pas être variable.

Cette qualité n'est pas triviale. Elle dépend comme précédemment de la nature des pratiques des unités d'exploitation. Si par exemple le contrôle porte sur des nombres d'unités de pêche (par flottes de pêche), l'argument a de l'équation (1) n'est pas variable si les unités d'une flotte recourent toujours au même type d'action (unités spécialisées). Dès lors, en termes de capacité de prévision des conséquences d'une décision, l'information contenue dans l'estimation des paramètres θ de f_θ dans l'équation (1) est d'autant plus utile que les unités de pêche n'ont pas de choix entre plusieurs types d'action.

Si plusieurs flottes de pêche participent à l'exploitation de la ressource et qu'elles peuvent avoir des pratiques relevant de l'un ou de l'autre des comportements décrits plus haut, l'usage exclusif de modèles construits pour répondre aux questions biologiques initiales n'est donc pas neutre en termes d'évaluation des stratégies de pêche : on est amené à privilégier l'observation auprès des unités spécialisées et la qualité de l'évaluation des conséquences de décisions est supérieure si ces décisions portent sur l'activité de ces unités qui sont donc à ces titres mieux identifiées et mieux observées.

Le schéma présenté figure 1 illustre cette situation : il s'agit d'une caricature inspirée de la pêche au Sénégal. Les unités de pêche des deux premières flottes ont un rayon d'action non limité et peuvent mettre à profit leurs connaissances et savoir-faire pour poursuivre dans ses déplacements la composante de la ressource dont elles privilégient la recherche. Les unités de la troisième flotte, ont intérêt à

mettre à profit leurs connaissances et savoir-faire pour privilégier à chaque moment la recherche d'un stock accessible à ce moment.

La présence (figure 1) des treize unités de la troisième flotte pose les difficultés indiquées dans les paragraphes précédents pour le suivi de l'état de la ressource et pour la gestion. Il s'agit alors de savoir si leur présence est d'une façon ou d'une autre jugée importante, auquel cas il faut en tenir compte dans le traitement des données.

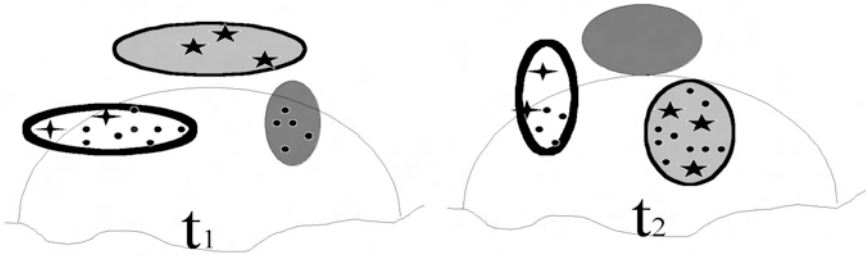


Figure 1. Exploitation halieutique portant sur trois « stocks » et composée de trois flottes de pêche présentée aux temps t_1 et t_2 .

Deux flottes réunissent des unités (2 ✦ et 3 ★) privilégiant toujours la recherche d'un même stock. La troisième flotte réunit des unités (13 ●) de rayon d'action limité, devant rechercher à chaque moment un stock accessible.

Diverses raisons peuvent justifier l'intérêt accordé à la présence de ces unités : d'abord, leur pratique leur garantit d'avoir à tout moment une solution « rentable » (viabilité de l'exploitation) ; ensuite, leur pratique peut les amener à abandonner la recherche de stocks dont l'abondance se réduit de façon excessive et ainsi d'amoin-drir, évidemment sans forcément les résoudre, les problèmes de surexploitation (viabilité de la ressource) ; enfin, leur existence peut être jugée nécessaire pour de nombreuses raisons socio-économiques non directement liées à la pêche (tel peut être le cas s'il s'agit en général des unités de pêche artisanales).

Il faut donc en tenir compte dans la construction d'un modèle. Au vu des raisons énoncées ci-dessus, il apparaît clairement que ce modèle relève d'un contexte pluridisciplinaire dès lors qu'il va rendre compte de pratiques d'acteurs et qu'il sera utilisé dans un contexte élargi de gestion. Par ailleurs, dans la mesure où les difficultés rencontrées viennent de l'analyse de données collectées selon un protocole dont la qualité n'a pas été remise en cause, la construction de ce modèle peut être initiée en prenant explicitement en compte ces difficultés et ce modèle doit pouvoir être appliqué en traitant ces données.

Une question sous-jacente est celle de la légitimité des questions initiales (biologiques ici) dans ce nouveau contexte. On verra que cette légitimité est renforcée et qu'il est important d'en tirer parti dans l'évolution des problématiques (questions) posées de l'intérieur des disciplines.

CONSTRUCTION D'UN MODÈLE ET TRAITEMENT DES DONNÉES

La question soulevée est liée à la variabilité, causée par les décisions des unités de pêche, de l'argument décrivant l'activité de pêche dans l'équation (1). Cela signifie qu'une activité « constante » (par exemple décrite par un ensemble de flottes de pêche – ou stratégies – d'effectifs constants, chacune caractérisée par une liste d'actions disponibles) peut engendrer un impact variable dans le temps. Selon l'équation (1), les effectifs des strates dont l'argument a_t est une fonction (équation (2)) peuvent s'écrire :

$$f_{jt} = \sum_s p_{sjt} N_{st} \quad (3)$$

Dans cette équation N_{st} est le nombre d'unités de pêche de la flotte s au temps t . p_{sjt} est la probabilité qu'une unité de pêche de la flotte s choisisse d'entreprendre une action de type j au temps t . Avec ce formalisme, les f_{jt} peuvent être variables même si les effectifs N_{st} des flottes restent constants. Dans tous les cas les variations temporelles des deux représentations de l'activité telles que représentées par les f_{jt} et les N_{st} ne sont plus caractérisées par les mêmes fréquences.

Ce nouveau contexte est caractérisé par deux changements majeurs :

- l'équation (1) est complétée d'une seconde décrivant les effectifs f_{jt} des strates qui ne sont plus seulement « donnés ». L'ensemble forme un système dynamique « ressource-exploitation » ;
- l'activité de pêche est décrite en faisant appel à une nouvelle typologie, relative aux unités de pêche. En cohérence avec l'équation (3), un type (flotte ou stratégie) regroupe des unités de pêche ayant en commun une règle de décision conduisant chacune d'entre elles à adopter une action d'un type donné avec la même probabilité à un temps t donné.

La distinction entre unités de pêche et actions de pêche...

Les unités de pêche et les actions de pêche sont des unités de nature différente et il peut paraître « surprenant » de n'avoir pas explicitement fait cette distinction dès le début de cette présentation. En fait cette distinction n'est pas nécessaire si on suppose qu'une unité de pêche n'a qu'un type d'action à sa disposition et nous avons vu que cette caractéristique conduit à satisfaire les conditions permettant le traitement selon le cadre défini par l'équation (1) des données collectées.

En d'autres termes, l'adoption initiale de ce cadre conduit à sélectionner des observations permettant de négliger cette distinction, pour pouvoir supposer qu'à une activité de pêche donnée il n'y a pas de variabilité – explicable par cette activité – de son impact sur la ressource. D'une manière générale, l'étude de cette variabilité est une question « orpheline » dont l'identification est en elle-même (une) problématique (Laloë, 1999).

Cela peut expliquer pourquoi cette distinction n'apparaît pas dans la très grande majorité des modèles utilisés en halieutique, même si ce problème a été soulevé il y a plusieurs décennies (Garrod, 1973 ; Gulland et Garcia, 1984) et si des modèles ont été proposés (par exemple Allen et Mac-Glade, 1986), parfois associés à des

traitements de données pour réaliser des typologies (Pelletier et Ferraris, 2000) ou pour expliciter les règles de décisions avec l'estimation des paramètres des modèles considérés (Gaertner *et al.*, 1999 ; Holland et Sutinen, 1999).

...pour l'articulation des dynamiques de l'exploitation et de la ressource

Concrètement, la construction d'un modèle articulant dynamique d'exploitation et dynamique de la ressource impose l'écriture d'équations relatives aux probabilités p_{sjt} considérées dans l'équation (3). Ces équations peuvent refléter l'idée simple selon laquelle la probabilité de mettre en œuvre une action disponible de type j augmente ou diminue d'un pas de temps au suivant en fonction de la comparaison du revenu espéré de l'adoption de cette action avec ceux de l'ensemble des actions disponibles. Cette comparaison peut être formulée à partir de modèles économétriques des comportements de choix qualitatifs (McFadden, 1973).

On trouvera une application concrète de cette démarche dans Pech *et al.* (2001). Le modèle ainsi construit comporte un nombre de paramètres beaucoup plus élevé que celui correspondant à θ dans l'équation (1). Cette équation est toujours présente, avec ses paramètres, mais on doit également prendre en considération tous les paramètres des équations relatives aux décisions des unités de pêche. Il s'agit des prix et coûts permettant d'estimer des revenus, il s'agit aussi des paramètres associés aux règles de décision (les unités peuvent modifier leur choix à des rythmes plus ou moins élevés selon leur stratégie). Un second groupe, ϕ , de paramètres vient donc compléter celui déjà présent. Il convient d'estimer les valeurs de ces paramètres et les estimations $\{\theta_{est}, \phi_{est}\}$ ainsi produites constituent le résultat du traitement des données ou au moins une étape de ce traitement.

Ce traitement de données diffère de celui réalisé dans le contexte de l'équation (1) par la construction des séries chronologiques d'effectifs de strates qu'il réalise. Il ne s'agit plus de suivre l'état de la ressource conditionnellement à des valeurs données d'effectifs de strates, mais de suivre également, et en même temps, ces effectifs. Ces séries d'effectifs peuvent être comparées à celles qui sont observées. L'ajustement du modèle aux données porte alors également sur la ressemblance entre ces séries en incluant par exemple les carrés d'écart entre effectifs observés et ajustés (Pech *et al.*, 2001). Il s'agit, concrètement, de rechercher les valeurs des paramètres conduisant à une valeur minimum du critère ci dessous :

$$\sum_{strate} \left[\sum_{temps} (net - \hat{net})^2 \right] + \sum_{strate, stocks} \left[\sum_{temps} (Ceit - \hat{Ceit})^2 \right]$$

Où net et \hat{net} sont les effectifs observés et ajustés des strates et $Ceit$ et \hat{Ceit} sont les rendements observés et ajustés pour les stocks au sein de chaque strate. Chaque série peut être pondérée par l'inverse de son écart type empirique.

Dans le cas d'une application aux données de pêche artisanale au Sénégal³ (Pech *et al.*, 2001) on obtient ainsi les résultats présentés dans la figure 2. Ici, les valeurs ajustées sont une fonction du modèle utilisé, avec les valeurs estimées des paramètres. Ces valeurs sont des fonctions des données utilisées et figurent parmi les résultats de leur traitement.

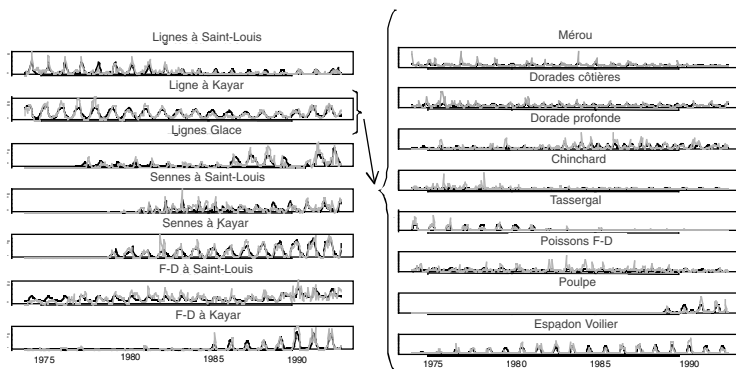


Figure 2. Résultats pour une application aux données de pêche artisanale sur la côte nord du Sénégal (Kayar et Saint-Louis).

À gauche : valeurs ajustées et observées des effectifs de strates d'échantillonnage, combinaisons engin-port. À droite : valeurs ajustées et observées des rendements par action (pour les huit stocks capturables par les lignes à Kayar). D'après Pech *et al.*, 2001.

COMPLEXITÉ

Le modèle ainsi construit est complexe au sens de Legay (1997) qui définit comme tel un système que la perte d'un de ses éléments fait changer de nature. Toujours selon Legay, la première conséquence de ce changement est la perte du critère d'évidence : aucune assertion concernant des objets biologiques ne s'assied plus sur une quelconque évidence, mais sur un réseau de cohérences. Une des conséquences de cette perte d'évidence est directement liée au problème d'estimation des paramètres et, au-delà, à celui de la forme des fonctions utilisées dans les diverses équations du modèle. Les estimateurs de θ et de ϕ peuvent être corrélés⁴, ce qui signifie que les estimations obtenues pour une partie des paramètres (par exemple θ) peuvent dépendre d'hypothèses, explicites ou non, faites sur d'autres (par exemple ϕ). De ce point de vue, l'adoption d'un modèle correspondant à la seule équation (1) conduit à faire une hypothèse sur ϕ (une unité de pêche n'a qu'un type d'action à sa disposi-

3. Dans cette application relative à la pêche artisanale au Sénégal, le système d'enquête comporte sept strates (combinaisons port-engin), chacune réunissant une ou plusieurs tactiques. La ressource est composée de treize stocks. Les données traitées sont, par quinzaine de jours de 1974 à 1992, les effectifs des strates et, pour chacune d'elles, les rendements pour les stocks capturables par au moins une des tactiques de la strate. Cinq stratégies et vingt-deux tactiques de pêche artisanale sont définies. Cinq des tactiques (une par stratégie) correspondent au choix de ne pas pêcher ou de pêcher en dehors de la zone d'étude. Une sixième flotte « industrielle » dont les unités ne disposent que d'une seule tactique est considérée pour rendre compte des captures réalisées par les flottes industrielles.

4. En rappelant que les estimateurs sont des variables aléatoires et que les estimations concrètes sont des réalisations de ces variables.

tion, qu'elle met en œuvre de façon certaine). L'estimation de θ est alors produite conditionnellement à cette hypothèse et elle peut en dépendre.

Ce problème peut donc affecter la qualité de la réponse à la question biologique initiale. Il peut être illustré par les deux exercices de simulation qui suivent. Le premier est relatif au choix de la fonction f_θ et de ses paramètres dans le contexte de l'équation (1). Il est prolongé d'un second, considérant pour un même jeu de données deux pratiques d'exploitation possibles et les conséquences qui en découlent sur l'estimation des paramètres.

QUELLE FONCTION f_θ DANS L'ÉQUATION (1) ?

Un des modèles de référence en halieutique est celui de Schaefer (1957). La ressource est un stock, dont l'état est représenté par une biomasse, B_t au temps t :

$$dB_t / dt = r B_t (1 - B_t / K) - q f_t B_t$$

La dérivée de la biomasse est la différence entre une production décrite selon un modèle logistique avec ses deux paramètres r et K , taux de croissance et capacité de charge (ou biomasse vierge dans le vocabulaire halieutique) et un prélèvement, fonction de la biomasse, de l'activité de pêche représentée par l'argument f_t (effort de pêche « effectif » dans le vocabulaire halieutique) et d'un paramètre q (capturabilité).

La relation à l'équilibre ($dB_t / dt = 0$) associée à ce modèle est de forme parabolique (figure 3). On peut pour diverses raisons supposer qu'une certaine proportion α de la biomasse vierge est totalement inaccessible à la pêche, tout en faisant partie de la biomasse « productrice » :

$$dB_t / dt = r B_t (1 - B_t / K) - \theta f_t (B_t - \alpha K)$$

L'existence d'une biomasse inaccessible peut être liée à un rayon d'action limité des exploitants (Fréon, 1986) ou à un comportement particulier de la ressource. Elle peut aussi résulter de la mise en place d'une aire protégée... Quoiqu'il en soit, cette formulation comporte un paramètre $q = \{r, K, q, \alpha\}$.

On simule la dynamique d'un stock ainsi exploité avec des valeurs arbitraires de θ (dont $\alpha = 0,1$) et d'une série chronologique d'efforts croissante puis décroissante (flèche dans la figure 3). On obtient ainsi une série de captures présentée figure 3 avec celle des efforts. Une présentation plus complète de cet exercice est donnée par ailleurs (Laloë, 1995).

Cette série est ensuite proposée pour ajustement par un second modèle :

$$dB_t / dt = r B_t (1 - [B_t / K]^{(m-1)}) - q f_t B_t$$

Il s'agit du modèle de Pella et Tomlinson (1969) dans lequel la production de biomasse est décrite par un modèle logistique généralisé en élevant le terme B_t / K à la puissance $(m - 1)$. Avec cette expression, lorsque m est compris entre 1 et 2 exclus, ($m = 2$ correspondant au modèle de Schaefer), la production maximale correspond à des valeurs de biomasses inférieures à la moitié de la biomasse vierge, ce qui semble raisonnable pour de nombreuses espèces exploitées. Dans l'exemple présenté, la qualité de l'ajustement obtenu avec une estimation de 1,05 pour m apparaît « parfaite » (figure 3, pointillés).

En conclusion, on ne peut pas choisir entre les deux solutions conduisant aux estimations des paramètres $\theta = \{r, K, q, \alpha\}$ ($\alpha = 0,1$) et $\theta = \{r, K, q, m\}$ ($m = 1,05$). On constate enfin (figure 3) que les relations à l'équilibre de ces deux modèles apparaissent très semblables.

Cet exemple illustre une question qui n'est pas nouvelle. Feller (1940) a ainsi montré que plusieurs modèles d'équations différentielles, pouvant donner lieu à des interprétations biologiques très différentes, s'ajustaient au moins aussi bien qu'une loi de croissance logistique à des données de croissance d'une population de protozoaires *in vitro*. Dans des conditions d'observation et de contrôle beaucoup plus efficaces que celle rencontrées en halieutique, il concluait que « *Thus in no special case any biological conclusion must be based solely on an agreement between the observed data and the logistic form* ».

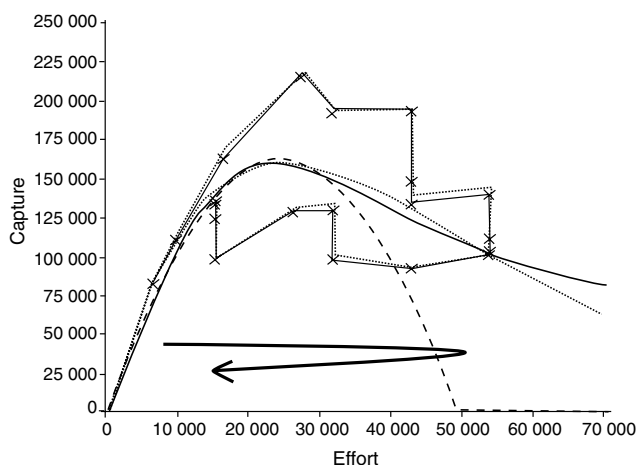


Figure 3. Captures en fonction de l'effort (croissant puis décroissant).

Série simulée (traits pleins) de captures et d'efforts en considérant $m = 2$, $a = 0,1$ et une série d'efforts croissants puis décroissants (flèche). Série issue de l'ajustement de ces données par un modèle de Pella et Tomlinson (pointillés, $m = 1,05$, $a = 0$). La parabole correspond à la relation à l'équilibre du modèle de Shaefer ($m = 2$, $a = 0$), les deux autres courbes lisses correspondent aux captures à l'équilibre avec les deux modèles.

Ce premier exemple ne comporte aucune incertitude sur la formation, à partir de l'activité de pêche, de la valeur de l'argument qui en rend compte dans l'équation du modèle. Cet aspect est abordé dans le second exemple ci après dont une présentation plus détaillée est faite dans Laloë *et al.* (1998).

UNE OU DEUX TACTIQUES, CONSÉQUENCES SUR L'ESTIMATION DE θ

On considère maintenant que la ressource est composée de deux stocks. La dynamique de chacun de ces stocks est caractérisée par une fonction de production logistique. Pour un des stocks on suppose qu'une très petite quantité de biomasse est inaccessible ($\alpha = 0,001$), contrairement à l'autre pour lequel $\alpha = 0,1$. On considère

une flotte de pêche dont le nombre d'unités croît puis décroît dans le temps. Chaque unité de pêche peut choisir entre deux tactiques permettant des captures dans des proportions différentes sur les deux stocks. Chacune des tactiques correspond ainsi à la recherche privilégiée d'un des stocks. Elles peuvent impliquer l'usage du même engin à partir du même port, et ne différer par exemple que par le lieu de pêche choisi. Dans un protocole usuel d'échantillonnage, elles peuvent être confondues au sein d'une même strate. Dans la simulation on considère que, d'un pas de temps au suivant, la proportion d'unités adoptant une tactique augmente (diminue) d'autant plus que le revenu obtenu avec cette tactique au dernier pas de temps écoulé est supérieur (inférieur) à celui obtenu avec l'autre.

Les paramètres de croissance et de capacité de charge sont choisis de façon à ce que le stock dont la quasi totalité de la biomasse est accessible puisse être en état « dangereux » de surexploitation (*figure 4*). Lorsque le nombre d'unités de pêche augmente, la biomasse de ce stock diminue très fortement, engendrant une diminution des revenus obtenus en privilégiant sa recherche. Il en découle une augmentation de la proportion des unités privilégiant la recherche de l'autre stock. Il se peut même qu'une augmentation du nombre d'unités se traduise par une diminution du nombre d'actions privilégiant la recherche du stock surexploité. Concrètement, cela conduit à une variabilité de l'argument représentant l'impact de l'activité nettement moindre pour le stock surexploité (*figure 4, gauche*). Sur cette figure sont également présentées, pour chaque stock, les séries chronologiques ainsi simulées de capture et d'effort ainsi que les relations correspondantes sous hypothèses d'équilibre.

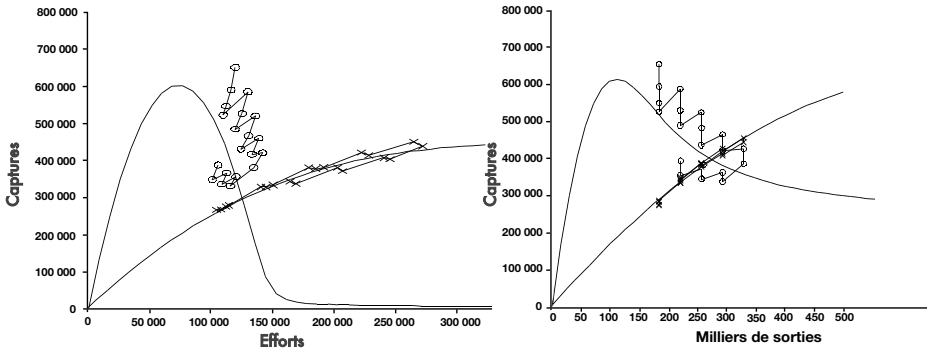


Figure 4. Séries de captures et efforts pour une flotte de pêche exploitant deux stocks de poissons.

À gauche, données simulées en considérant deux tactiques de pêche disponibles (les efforts sont pour chaque stock fonctions des nombres d'actions de pêche pondérés par les capturabilités et les proportions d'usage de chaque tactique). À droite, les mêmes séries avec l'hypothèse d'absence de choix tactique (les efforts sont alors proportionnels au nombre d'unités de pêche). Les courbes « lisses » correspondent aux relations sous contraintes d'équilibre.

On peut maintenant « oublier » que deux tactiques peuvent être présentes et considérer qu'il n'y en a qu'une seule. Dans ces conditions, l'argument représentant l'activité de pêche est de façon naturelle le nombre d'actions de pêche, proportion-

nel au nombre d'unités. Les deux séries de captures et d'efforts sont présentées sur la figure 4 (*droite*). Ces deux séries sont ajustées en recherchant pour chaque stock quelles valeurs $\{r, K, q, \alpha\}$ conduisent à des captures les plus semblables possibles à celles obtenues par la simulation (en utilisant un critère de moindres carrés). On obtient de nouveau un ajustement excellent, mais alors que la valeur α pour le stock « fragile » était très faible dans la simulation (0,001) elle est maintenant de l'ordre de 0,1 (0,096). Les relations à l'équilibre associées aux modèles des deux stocks sont également présentées figure 4 (*droite*).

On constate que les modèles « biologiques » sont très différents et que l'estimation de θ dépend donc des hypothèses faites, explicitement ou non, sur les valeurs des autres paramètres.

Cette simulation a été conçue pour refléter une situation dans laquelle un stock peut être surexploité, au sein d'un système dans lequel cette surexploitation, pour une raison ou pour une autre, ne conduit pas à la catastrophe qui pourrait se produire en cas d'augmentation de l'activité. Ici toute augmentation de « l'activité » selon la représentation dans la figure 4 à gauche conduirait à une extinction du stock ; la catastrophe ne se produit pas « grâce » au comportement des pêcheurs. Les données contiennent cette information d'absence de catastrophe. Appliqué à ces mêmes données, un modèle négligeant l'existence de ce comportement conduit à restituer cette information d'une autre manière, avec une certaine quantité de biomasse inaccessible. En revenant à l'exemple précédent, il est vraisemblable qu'un modèle de Pella et Tomlinson aurait pu conduire aussi à un résultat cohérent, avec une valeur proche de 1 pour le paramètre m de l'équation correspondante...

RETOUR AUX QUESTIONS BIOLOGIQUES : UNE DOUBLE LÉGITIMITÉ DANS UN CONTEXTE D'INTERDISCIPLINARITÉ

Les trois solutions cohérentes avec le jeu de données (deux tactiques et un modèle de Schaefer ; une tactique et une biomasse inaccessible ; une tactique et un modèle de Pella et Tomlinson) sont extrêmement différentes en termes de réponses aux questions biologiques initiales. Il n'est donc pas possible d'y répondre sans ambiguïté selon un traitement de ce type de données. Ces questions ont cependant été posées et restent disciplinairement légitimes. Pour tenter d'y répondre il est nécessaire de se placer dans un contexte disciplinaire rigoureux et entre autres de collecter des données selon un protocole construit pour répondre à ces questions (par exemple avec des campagnes de chalutage scientifique ou bien des campagnes d'échointégration).

On peut ainsi, sinon trouver la bonne solution parmi celles apparues cohérentes, au moins en éliminer certaines. Les questions biologiques trouvent à ce titre une légitimité « externe » à la biologie, ce qui renforce évidemment leur intérêt.

Par ailleurs ces questions biologiques ne sont plus seules et sont posées dans un contexte d'interdisciplinarité. Elles doivent être articulées avec d'autres questions, posées dans d'autres domaines. Mais la seule articulation « théorique » combinant des modèles acceptables dans les domaines disciplinaires concernés peut conduire à

des incohérences. Dans l'exemple présenté, les combinaisons « modèle de Shaefer et une seule tactique » ou bien « modèle avec biomasse inaccessible importante et deux tactiques » conduisent à un risque de réduction injustifiée de l'activité de pêche dans le premier cas ou bien, dans le second, à un optimisme béat pouvant conduire à un laisser faire aux conséquences potentiellement catastrophiques.

DISCUSSION

Depuis quelques années en halieutique, la ressource exploitée est de plus en plus systématiquement définie comme un écosystème (par exemple Hollingworth, 2000), avec donc plusieurs composantes en interactions entre elles et avec leur environnement.

78

Plusieurs approches écosystémiques possibles

Ce choix peut être justifié d'au moins deux points de vue : d'un côté, à partir de considérations propres à l'écologie, considérant que la dynamique de la ressource et celle des captures ne peuvent se comprendre sans références aux multiples interactions entre les diverses composantes qui constituent l'écosystème, de l'autre, à partir de l'analyse des pratiques de pêche lorsqu'il apparaît évident qu'un pêcheur choisit entre des actions caractérisées par des captures de compositions spécifiques différentes et que ses décisions (qui font partie de la « gestion » et qui participent à la dynamique du système d'exploitation) ne peuvent donc être comprises dans le cadre d'études monospécifiques « juxtaposées ».

Dans tous les cas un modèle d'écosystème doit être adopté, mais les choses sont très différentes selon qu'on articule ou non le premier point de vue « écosystémique » avec le second relatif aux pratiques des exploitants.

Une première différence, d'apparence anodine, peut être relative aux choix d'échelles spatiales et ou temporelles qui ne dépendent plus seulement des connaissances et questions relatives à l'écosystème. Les pas de temps utilisés sont fréquemment annuels. Ce choix peut présenter l'intérêt de réaliser une intégration sur une période complète et donc de s'affranchir d'une représentation explicite des saisonnalités. Ceci peut être justifié si chaque unité de pêche n'a qu'un type d'action à sa disposition ou si la saisonnalité de ses décisions reste la même d'années en années. Cela l'est beaucoup moins dans le cas contraire...

Une seconde différence porte sur les conséquences de la représentation de l'activité. Dans un modèle d'écosystème, l'argument synthétisant l'activité d'exploitation a une dimension généralement égale à celle de la variable décrivant la ressource (prélèvements ou taux de prélèvements selon chacune de ses composantes). L'impact d'un changement d'activité est donc évalué à partir de la nouvelle valeur de ces quantités. Cette évaluation est simple si l'exploitation est constituée d'un nombre de flottes égal au nombre de composantes de la ressource, chacune réalisant des captures sur une des composantes de la ressource⁵. S'il apparaît impossible de décrire ainsi les conséquences d'un changement d'activité, une solution peut être de représenter la ressource selon un modèle tenant compte de sa distribution spatiale et

d'annuler l'impact de la pêche dans une partie de l'aire de répartition de la ressource. C'est ce que propose un modèle tel qu'Ecospace⁶ (Walters *et al.*, 1999), permettant d'évaluer l'impact d'aires marines protégées.

L'articulation du modèle d'écosystème avec un modèle décrivant l'argument synthétisant l'activité d'exploitation permet d'élargir, d'une part la gamme de changements dont on peut estimer l'impact et, d'autre part, le domaine (ressource et activité) concerné par ces impacts. À partir du schéma présenté figure 1, on peut considérer les conséquences d'un changement des nombres d'unités de pêche pour les deux premières flottes. L'impact sur les stocks concernés est « observé » par les unités de la troisième flotte qui adaptent en conséquence leurs décisions, même si leur effectif reste inchangé. Si on raisonne conditionnellement à un impact donné de ces unités, l'estimation des conséquences des changements d'effectifs des deux premières flottes ne porte plus que sur la ressource. Elle sera de plus biaisée.

Conséquences pour l'aide à la décision

Cela conduit à aborder un troisième type de différences relatif à l'examen, dans une perspective d'aide à la décision, des conséquences liées à des changements, prévisibles ou non et décidables ou non.

Les modèles d'écosystèmes permettent d'évaluer en termes d'état d'écosystème les conséquences de changements de valeur de l'argument rendant compte de l'activité de pêche. Les objectifs justifiant des prises de décision sont donc relatifs à l'état de l'écosystème (ou des fonctions de cet état) et les décisions portent sur les valeurs de l'argument, ou sur des variables dont les valeurs de cet argument sont une fonction. Cela rend très cohérentes des démarches telles, par exemple, que celle exposée par Pitcher et Pauly (1998) dans laquelle l'objectif affiché est la « reconstruction des écosystèmes » décrits selon un modèle adéquat, en l'occurrence Ecopath (Christensen et Pauly, 1992). Dans cet exemple les décisions portent sur la mise en place d'aires marines protégées et les autres domaines de connaissance⁷ sont instrumentalisés aux services de cet objectif et de cette décision.

L'articulation permet d'élargir la gamme des décisions et celle de leurs conséquences. En revenant à l'exemple inspiré du schéma de la figure 1 les effectifs des deux premières flottes sont peut-être contrôlables (par des licences de pêche). Les fixer à une valeur donnée va conduire à un changement de l'état de l'écosystème et à

5. Ceci peut justifier l'accent fréquemment mis sur le besoin de privilégier des méthodes de pêche sélectives (sans captures accessoires, voir par exemple Pitcher et Preikshot, 2001). Mais cela n'est pas évident comme le remarque Mace (2001) : « *There is a general belief that more selective fishing gears are needed [...] However, is it 'better' to selectively remove top predators or high biomass pelagics, or to harvest a range of species more or less in proportion to their relative abundance?* ».

6. Ecospace permet en outre de décrire des choix spatiaux d'activité, rendant compte par exemple d'une exploitation plus élevée en bordures d'aires protégées si les abondances y sont plus élevées qu'ailleurs (Walters, Pauly et Christensen, 1999).

7. En l'occurrence, « dynamique des populations » (mono-spécifique), « aménagement des pêches » (réglementation), « connaissance traditionnelle de l'environnement » et « socio-économie ».

un changement d'activité des unités de la troisième flotte. L'objectif peut être énoncé selon un ou l'autre de ces aspects, ou sur une combinaison des deux. En tout état de cause, les conséquences de la décision doivent tenir compte de la complexité du système. Et il convient encore une fois d'insister sur le fait que cette complexité est ici bien présente selon la définition de Legay (1997) déjà énoncée. Ce système change en effet de nature si on en retire la composante représentant les décisions des unités de pêche.

Les conséquences de ce retrait peuvent être ici l'incapacité de décrire les conséquences de changements sur certains aspects du système, et un biais d'estimation de celles que le modèle d'écosystème est censé permettre d'analyser.

Dans l'application à la pêche sénégalaise dont une partie des résultats de l'ajustement est présentée figure 2, l'application du modèle peut être poursuivie, avec les valeurs estimées de l'ensemble des paramètres au-delà de la période de données utilisées (1992). Certains changements peuvent alors être introduits de façon arbitraire, reflétant divers types d'événements. Ils sont dans cet exemple (Pech *et al.*, 2001) relatifs à :

- des changements dans l'environnement économique en général (augmentation en année + 2 du prix des espèces exportées, conséquence possible de la dévaluation du franc CFA en 1994) ;
- des changements dans l'environnement de la ressource (réduction d'un facteur 3 de la capacité de charge pour le stock de poulpes en année + 6) ;
- des changements liés à des décisions portant directement sur l'activité de pêche (multiplication par 3 en année + 8 de la capturabilité des navires des flottes industrielles à l'encontre de deux stocks, mérus et chinchard) ; ceci peut résulter de l'octroi de licences de pêche par exemple lors de négociations d'accords de pêche...

Selon le modèle utilisé, avec les valeurs retenues des paramètres, l'impact des changements introduits peut être évalué en termes d'activité des unités de pêche artisanales et en termes de rendements de pêche. C'est ce qui est présenté sur la figure 5 ci-dessous, avec le prolongement des séries chronologiques de la figure 2.

Les conséquences des changements introduits peuvent être appréciées en examinant les résultats présentés figure 5, en termes d'activité (à gauche) et de rendements (à droite). On observe que les choix des unités de pêche artisanale se traduisent par des variations très importantes des effectifs des strates. Examiner les conséquences des changements introduits, en supposant fixé l'impact de l'activité de ces unités de pêche conduirait à des biais importants d'estimation...

Ces résultats sont cohérents avec les données traitées. Il sont un produit de ce traitement, conditionnellement au modèle utilisé. Leur qualité dépend donc des connaissances utilisées dans la construction de ce modèle et doivent bien entendu faire l'objet d'une critique minutieuse à la lumière des connaissances disponibles. Ils renvoient donc aux questions initiales, ils en renforcent l'intérêt et ils participent, éventuellement, à leur identification...

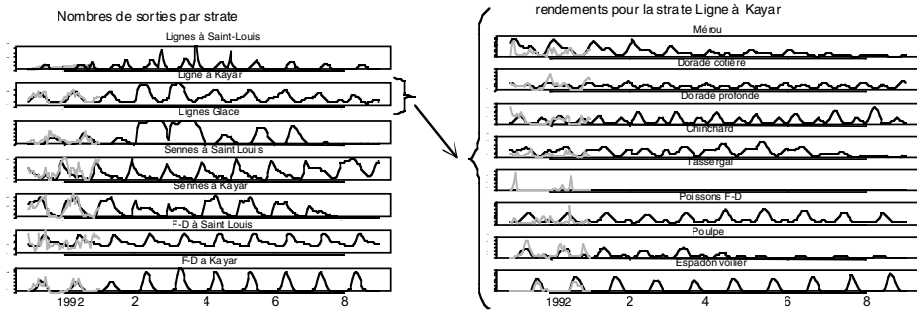


Figure 5. Valeurs observées et ajustées (1991-1992) et prolongement de l'application avec les valeurs estimées des paramètres et l'introduction de certains changements (voir texte) en années + 2, + 6 et + 8. À gauche, nombres d'actions par strate. À droite, rendements par action de la strate « ligne à Kayar » pour les huit stocks concernés (d'après Pech *et al.*, 2001).

Légitimité des données, de leur analyse et de leur traitement

Ici, le besoin d'articulation a été identifié à partir de l'analyse de données d'activité et résultats de pêche.

En donnant aux mots réalité, événement et fait les acceptions utilisées par Legay (1993)⁸, ces données sont collectées, selon un protocole raisonné, auprès de la réalité, pour répondre à des questions. Un jeu de données concret⁹ rassemblant de telles données est un événement, réalisation unique d'une variable aléatoire. Au delà, l'existence de tels jeux de données constitue un fait dans la conduite des recherches relatives aux systèmes d'exploitation halieutiques.

Si leur analyse indique que leur traitement ne peut se réduire à la seule estimation de paramètres initialement identifiés, l'importance de ce traitement s'en trouve accrue. Il s'agit d'une part de mieux connaître la qualité des réponses aux questions posées et, d'autre part, de contribuer à la formulation de questions. Celles-ci, dès lors qu'elles sont adoptées, sont fondamentales, même – et peut-être surtout – si leur adoption est en relation avec le domaine d'application affiché de la recherche. Ce traitement correspond ainsi à un impératif d'ordre déontologique.

Cela impose en outre de porter une attention particulière au statut des disciplines scientifiques porteuses des concepts ainsi mis en œuvre.

8. Est réel ce qui est acquis, même si on peut se tromper à son sujet, et ce qui est accessible, c'est-à-dire dont l'existence est supposée avec quelque raison dans l'état actuel de nos connaissances.

9. Par exemple, celui relatif à la pêche sénégalaise présenté dans ce chapitre.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLEN P. M. et MAC GLADE J. M., 1986, Dynamics of discovery and exploitation: the case of scotian shelf groundfish fishery. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 43, p. 1187-1200.
- BÉNÉ C., L. DOYEN et D. GABAY, 2001, A viability analysis for a bio-economic model, *Ecological Economics*, Vol. 36, Issue 3, March, p. 385-396.
- CHRISTENSEN V. et D. PAULY, 1992, ECOPATH II - A software for balancing steady-state models and calculating network characteristics, *Ecol. Modelling*, 61, p. 169-185.
- FELLER W., 1940, On the logistic law of growth and its empirical verifications in biology, *Acta biotheoretica*, ser. A, 5, p. 51-65.
- FRÉON P., 1986, *Réponses et adaptations des stocks de chupéidés d'Afrique de l'Ouest à la variabilité du milieu et de l'exploitation. Analyse et réflexion à partir de l'exemple du Sénégal*, Thèse dr. État, Univ. Aix Marseille, 241 p.
- GAERTNER D., PAGAVINO M., MARCANO J., 1999, Influence of fisher's behaviour on the catchability of surface tuna schools in the Venezuelan purse-seiner fishery in the Caribbean Sea. *Can. J. Fish. Aquat. Science*, 56, p. 394-406.
- GARROD D. J., 1973, Management of multiple resources. *J. Fish. Res. Board Can.* 30 1977-1985.
- GULLAND J. et GARCIA S., 1984, Observed patterns in multispecies fisheries, in R. M. MAY (ed.), *Exploitation of marine communities Dablen Konferenzen*, Berlin, Springer Verlag, p. 155-190.
- HOLLAND D. S., SUTINEN J. G., 1999, An empirical model of fleet dynamics in New England trawl fisheries. *Can. J. Fish. Aquat. Science*, 56, p. 253-264.
- HOLLINGWORTH C. E. (Guest Editor), 2000, Ecosystem effects of fishing, *ICES Journal of Marine Sciences*, Vol. 57, p. 3.
- LALOË F., 1985, *Étude de la précision des estimations des captures et prises par unité d'effort obtenues à l'aide du système d'enquêtes sur la pêche artisanale au centre de recherches océanographiques de Dakar Thiaroye*, Doc. Scient, CRODT, 100, 36 p.
- LALOË F., 1995, Should Surplus Production Models be fishery description tools rather than biological models? *Aquating living Resources*, vol. 8, 1, p. 1-16.
- LALOË F., PECH N., SABATIER R. and A. SAMBA, 1998, Model identification for flexible multifleet-multispecies fisheries. A simulation study, *Fisheries research*, 37, p. 193-202
- LALOË F., 1999, Le statut de la modélisation dans une démarche interdisciplinaire, *Natures Sciences Sociétés*, vol. 7, n°4, p. 5-13.
- LAUREC A., 1979, Analyse et estimation des puissances de pêche. *J. Cons. Int. Explor. Mer.*, 37, p. 173-185.
- LEGAY J.-M., 1993, Une expérience est-elle possible, in J.-D. LEBRETON et B. ASSELAIN (dir.), *Biométrie et environnement*, Paris, Masson, p. 1-14.
- LEGAY J.-M., 1997, *L'expérience et le modèle. Un discours sur la méthode*, Sciences en questions, Versailles, INRA éditions, 112 p.
- MACE P. M., 2001, A new role for MSY in single species and ecosystem approaches to fisheries stock assessment and management, *Fish and fisheries*, 2, p. 2-32.
- MCFADDEN D., 1973, Conditional logit analysis of qualitative choice behavior, in P. ZAREMBKA (ed.), *Frontiers in econometrics*, New-York, Academic Press, p. 105-142.
- PECH N., A. SAMBA, L. DRAPEAU, R. SABATIER et F. LALOË, 2001, Fitting a model of flexible multi-fleet-multispecies fisheries to Senegalese artisanal fishery data, *Aquatic Living Resources*, 14, p. 81-98.

- PELLA J. J. et P. K. TOMLINSON, 1969, A generalized stock production model, *Bull. Int. Am. Trop. Tuna Comm.*, 13, p. 419-496.
- PELLETIER D. et FERRARIS J., 2000, A multivariate approach for defining fishing tactics from commercial catch and effort data, *Can. J. Fish. Aquat. Science*, 57, p. 51-65.
- PITCHER T. J. et PAULY D., 1998, Rebuilding ecosystems, not sustainability, as the proper goal of fishery management, in PITCHER T. J., HART P. J. B. and PAULY D. (eds), *Reinventing fisheries management*, London, Kluwer Academic Publishers, p. 311-329.
- PITCHER T. J. et PREIKSHOT D., 2001, RAPFISH: a rapid appraisal technique to evaluate the sustainability status of fisheries, *Fisheries research*, 49, p. 255-270.
- POLOVINA J. J., 1984, Model of a coral reef ecosystem. I. The ECOPATH model and its application to French Frigate Shoals, *Coral Reefs*, 3, p. 1-11.
- SCHAEFER M. B., 1957, A study of the dynamics of the fishery for yellowfin tuna in the Eastern Tropical Pacific Ocean, *Bull. Int. Am. Trop. Tuna Comm.*, 2, p. 247--285.
- WALTERS C. J., V. CHRISTENSEN et D. PAULY, 1997, Structuring dynamic models of exploited ecosystems from trophic mass-balance assessments, *Rev. Fish Biol. Fish.*, 7, p. 139-172.
- WALTERS C. J., PAULY D. et CHRISTENSEN V., 1999, Ecospace Prediction of Mesoscale Spatial Patterns in Trophic Relationships of Exploited Ecosystems, with Emphasis on the Impacts of Marine Protected Areas, *Ecosystems*, 2, p. 539-554.

Chapitre 8

Modélisation spatiale et approche agronomique*

Je relate ici un itinéraire de recherche qui, sur plus d'une dizaine d'années, s'est construit par l'interaction entre plusieurs disciplines dont l'agronomie, la géographie et l'informatique. Je vais montrer quels sont les points forts de cette interdisciplinarité et ce qu'elle a produit. Les recherches portent sur la dynamique des activités agricoles et leur inscription territoriale. La problématique est centrée sur la maîtrise de l'embroussaillage par les élevages ovins dans la région des Grands Causses.

DE L'AGRONOMIE DES FAÇONS DE PRODUIRE À L'AGRONOMIE DES TERRITOIRES

L'agronomie est une science des techniques agricoles à l'interface entre les sciences de la vie et les sciences humaines. « C'est un corpus de connaissances techniques et pratiques dans la perspective d'aide à l'exercice de production en agriculture et à l'accomplissement des diverses fonctions qui lui sont associées » Deffontaines (2001). Les enjeux actuels de multifonctionnalité de l'agriculture sont pris en compte dans la nouvelle loi d'orientation agricole et de développement durable des territoires de 1999, qui met l'accent sur la responsabilisation de la sphère agricole et sa nécessaire implication dans les organisations territoriales, tant sociales que spatiales. L'agronomie est ainsi amenée à renforcer ses connaissances dans deux domaines, les façons de produire et le territoire. « L'agronomie des façons de produire, c'est une science de l'action, appliquée à la production de peuplements cultivés, à la protection des ressources renouvelables et à l'aménagement des territoires agricoles » Deffontaines (2001). Elle s'inscrit dans un objectif de développement durable, même si ce terme fait l'objet de nombreuses interprétations et laisse le champ libre à divers points de vue (Landais, 1998). « L'agronomie des territoires [s'attache à] formaliser les déterminants des systèmes de culture et des configurations paysagères [et envisage] la réponse aux divers objectifs à satisfaire et les marges de manœuvre » des agriculteurs pour modifier les manières de produire (Papy, 2001). Au-delà de la parcelle et de l'exploitation, elle s'applique à différentes entités territoriales et appelle à des préoccupations de développement régional (Sebillotte, 2001).

* Chapitre rédigé par Sylvie LARDON

C'est dans ce courant de pensée du département Sad de l'Inra que je m'inscris, en m'appuyant sur mes compétences initiales en biométrie et en développant les concepts, méthodes et outils de la modélisation spatiale (Lardon, 1999). De 1991 à 2001, avec P. L. Osty, agronome, nous avons analysé et formalisé l'organisation spatiale des activités d'élevage. L'organisation spatiale des activités d'élevage, c'est la façon dont les agriculteurs conçoivent leur système technique de production tout en répondant à des enjeux de gestion environnementale et de développement territorial. Pour l'étudier, nous avons associé agronomie et modélisation spatiale, tant il est vrai que l'agronomie ne peut être productive sans une compréhension des dimensions spatiales des processus agricoles et que la modélisation spatiale ne peut s'appliquer qu'à un domaine d'activités. Nous nous référons à l'agronomie et non pas à la zootechnie, alors que nous étudions les activités d'élevage, parce que nous travaillons au niveau des exploitations agricoles, à rechercher les logiques des exploitants et les cohérences des systèmes techniques de production (Osty, 1994). Nous prenons le point de vue de la modélisation spatiale et non pas de la biométrie, parce que nous nous positionnons à un niveau intégré, celui des faits techniques, dont nous recherchons les principes organisateurs et les modalités de maîtrise des phénomènes, plus qu'à leur mesure (Lardon *et al.*, 1990). Notre problématique articule composantes techniques et propriétés de l'espace pour accompagner le changement technique (Lardon *et al.*, 2001a).

Nous étudions la région des Grands Causses, zone de montagne du Massif Central éloignée des dynamiques urbaines et soumise à des phénomènes d'embroussaillage et de fermeture du paysage. On attend du maillage des exploitations agricole une certaine pérennité de l'occupation humaine et du maintien des activités et des usages, un certain contrôle de l'espace. Nous utilisons l'approche classique des agronomes qui consiste à mener des enquêtes en exploitation et à réaliser un travail de terrain, pour analyser les pratiques et comprendre les logiques des exploitants agricoles. Cette entrée par les activités est insérée dans une approche spatiale et temporelle qui emprunte à la géographie et à l'informatique des concepts, méthodes et outils. Comment ont évolué les systèmes techniques de production agricole ces trente dernières années ? Par quelles modalités techniques les exploitations d'élevage ont-elles un impact sur l'espace ? Telles sont les questions que nous nous sommes posées en analysant les élevages ovins extensifs du Causse Méjan et leur évolution par des enquêtes exhaustives en exploitation (une soixantaine) à plusieurs dates (1974, 1982, 1991, 1997). Nous avons rendu intelligibles les activités d'élevage et les marges de manœuvre des exploitations agricoles pour maîtriser les processus d'embroussaillage, en les positionnant selon leurs logiques de production et leurs formes d'organisation.

Le système technique de production est une « représentation de l'ensemble organisé de lois, de règles et de choix qui sont impliqués dans la constitution et le fonctionnement du système de production » (Osty *et al.*, 1998). Il est caractérisé selon cinq rubriques : les intrants et les extrants, l'espace utilisé, l'ensemble des moyens de production (cheptel, installations et équipements majeurs), le travail et les résultats autres que monétaires. Cette cohérence fonctionnelle s'inscrit sur le long terme dans

une cohérence stratégique : s'insérer dans des micro-filières, gérer les multi-usages de l'espace, gérer des équipements communs, vivre de l'agriculture dans ses systèmes d'activités et son genre de vie.

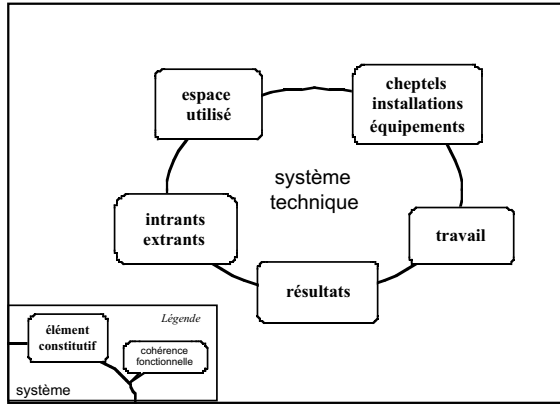


Figure 1. Système technique.

Les modes de conduite des troupeaux différencient les exploitations selon deux axes (Osty et Lardon, 2000). Le premier axe, selon que les objectifs de production des éleveurs s'ajustent à l'offre d'herbe ou répondent à un programme de production animale, conduit à une évolution tendancielle d'un *mode rustique* à un *mode fourrager*. Si la sécurisation par la constitution des stocks accompagne cette tendance, on observe des modes de valorisation de la ressource au pâturage, par des pratiques selon un mode pastoral ou selon une combinaison production animale-stock-pâturage que nous avons qualifiée de *mode complet*. Ces modes de conduite répondent à une augmentation de la taille des troupeaux, la constitution de lots d'animaux et des décalages saisonniers de production.

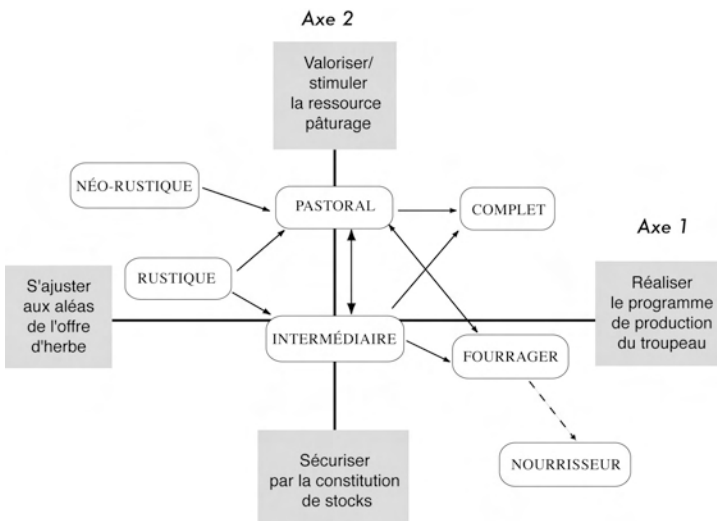


Figure 2. Modes de conduite des troupeaux et possibilités d'évolution d'un mode à l'autre.

Les modes d'organisation spatiale répondent à deux grands principes, celui de polarité et celui de contraste, correspondant aux modalités de circulation des animaux et aux modes de répartition des surfaces (Naitlho et Lardon, 2000). La circulation des animaux peut-être organisée autour d'un centre, qui est la bergerie, selon un *mode radial* ou on peut s'en affranchir, par exemple en jouant sur la contiguïté des parcelles, selon un *mode en enfilade*. Les surfaces utilisées peuvent être différenciées ou non et l'on peut amplifier cette hétérogénéité, par exemple en constituant des lots d'animaux et en spécialisant l'utilisation selon les saisons, comme dans le *mode mosaïque*, ou la répartir selon la distance, comme dans le *mode en auréole*. Selon la constitution des troupeaux, les objectifs de production, les aménagements réalisés, tous les modes d'organisation spatiale ne sont pas possibles et l'impact sur le paysage est différent.

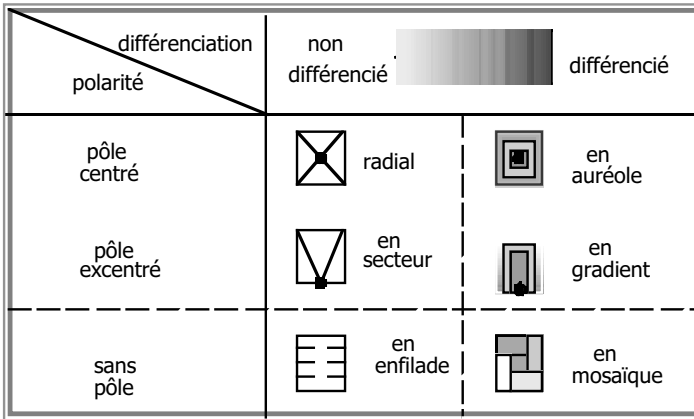


Figure 3. Modes d'organisation spatiale.

Ces grilles d'analyse permettent de répondre à des questions actuelles sur la contribution des élevages ovins des causses à la maîtrise de l'embroussaillage et à la production de paysages ouverts¹. Les concepts s'inspirent d'une approche système où « la réalité est replacée dans son environnement et les sous-systèmes sont distinguables, mais non dissociables » (Godard et Legay, 1992a). La complexité des systèmes est abordée par l'analyse des organisations (Le Moigne, 1990). La méthode des modèles est utilisée pour analyser les interactions entre la société, le milieu et la technique, dans leurs dimensions spatiales et temporelles (Legay, 1986). Les modèles sont progressivement articulés dans un itinéraire méthodologique où l'agronomie est à l'interface de la géographie et de l'informatique.

1. Programmes de recherche du ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement : « Recréer la nature » (1997-1999), « Politiques publiques et paysage » (1999-2002).

UN ITINÉRAIRE MÉTHODOLOGIQUE ARTICULANT MODÈLES AGRONOMIQUES, GÉOGRAPHIQUES ET INFORMATIQUES

Il ne s'agit pas pour moi de construire un modèle unique, incluant les différentes dimensions des phénomènes étudiés et répondant à une question globale, mais plutôt de générer une séquence de modèles spécifiques, se répondant les uns les autres et éclairant telle ou telle facette du problème. Ainsi, la modélisation n'est pas considérée comme une fin en soi, mais comme un processus de production, itératif et interactif. Les modèles sont mis en relation soit par les concepts qu'ils formalisent, soit par les données qu'ils mobilisent, soit par les procédures de traitements qu'ils réalisent, mais dans tous les cas, ils sont décomposés et recomposés pour s'adapter aux problèmes posés. Je m'appuie pour cela sur la grille de croisement espace-temps que nous avons conçue pour ajuster modèles, données et questions dans l'analyse des phénomènes spatio-temporels (Faivre *et al.*, 1999). L'itinéraire méthodologique qui résulte de ce processus de modélisation sur une dizaine d'années peut se relire selon trois étapes successives où les objectifs visés, les questions posées et les rapports aux disciplines diffèrent.

La première étape vise à comprendre la dynamique des systèmes techniques

Quelles sont les logiques de fonctionnement des exploitations agricoles ? Comment l'espace agit sur et est transformé par les pratiques agricoles ? Quelles sont les évolutions dans la durée ?

En complément des apports de l'agronomie, je suis allée chercher deux concepts dans les disciplines voisines, les modèles graphiques en géographie et les modèles objets en informatique, pour les adapter à la problématique agronomique.

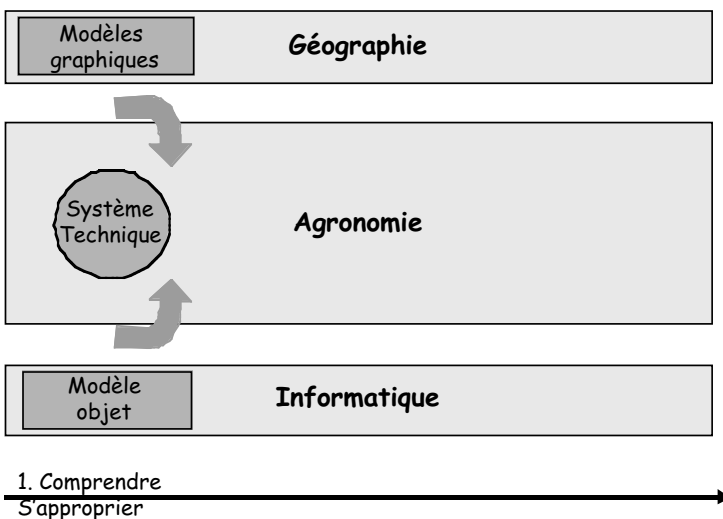


Figure 4. Première étape.

Le premier concept relève de la géographie des organisations qui recherche dans l'espace les principes organisateurs pour rendre intelligibles les observations et fournir un référentiel de modèles élémentaires, appelés chorèmes.

Un chorème est une structure élémentaire de l'espace, qui se représente par un modèle graphique [...]. Toute configuration spatiale relève de la combinaison, éventuellement très complexe, de mécanismes simples. Ceux-ci correspondent aux solutions que trouvent les sociétés à des problèmes de maîtrise de l'espace : appropriation, gestion, partition, drainage et irrigation, conquête ; et aux forces physiques avec lesquelles les sociétés ont à composer : pentes, gradients, étagements, dissymétries, gravité et gravitation (Brunet, 1986).

Les modèles centre-périphérie, en secteur ou en archipel, [...] élaborés pour rendre compte des organisations géographiques comme la ville et son bassin d'attraction, la ségrégation des quartiers urbains ou le réseau de petites villes, [...] répondent à des principes de hiérarchie, différenciation, distance [...]. On retrouve ces mêmes principes dans l'organisation des activités agricoles (Deffontaines *et al.*, 1993). C'est ainsi que nous avons adapté la grille des chorèmes élémentaires pour rendre compte de la diversification des activités et des pratiques de gestion de l'espace des exploitations agricoles (Bonin et Lardon, 2002).

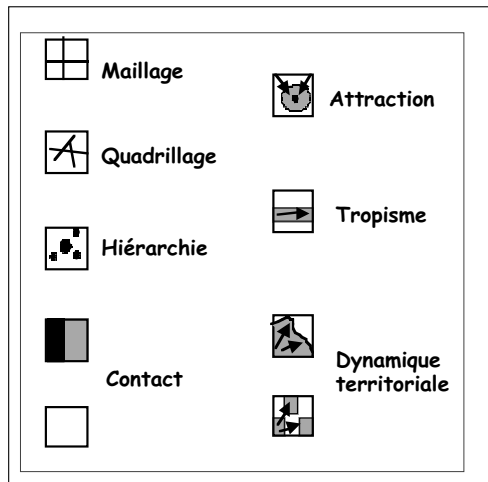


Figure 5. Grille des chorèmes.

L'autre concept relève de la conception informatique qui s'attache à définir et mettre en relation des objets qui ont une signification. La modélisation orientée objet facilite la représentation des processus, en encapsulant données et traitements des données dans des objets formalisés. Les entités géographiques sont distinguées selon qu'elles sont fixes, modifiables, déformables ou transformables et renvoient à des opérateurs spatio-temporels génériques de vie, de mouvement et de généalogie (Lardon *et al.*, 1999). C'est ainsi que nous avons formalisé les propriétés d'agrégation et de généralisation spatiales et représenté la dynamique dans les SIG (Bommel *et al.*, 2000).

C'est donc par analogie que j'ai procédé pour m'approprier les concepts de la géographie et de l'informatique et les adapter à une problématique agronomique. Cela demande des capacités d'exploration dans des disciplines proches, mais qui ont leur propre langage, ainsi que des capacités d'abstraction à partir d'objets similaires, mais qui relèvent de différentes problématiques. Paradoxalement, il ressort à l'expérience que ce ne sont pas les interactions prévues qui ont le mieux fonctionné. Mon objectif était d'aller chercher dans les disciplines connexes des concepts pour que l'agronomie s'en empare et les fasse siens. Force est de constater que l'assimilation n'est pas encore réalisée, peu d'agronomes de l'Inra utilisant les formalismes proposés. Par contre, les collègues géographes et informaticiens ont trouvé dans les objets de l'agronomie matière à collaborer et à publier, peut-être parce qu'une communauté scientifique en géomatique existe, en particulier au sein du GDR CNRS Sigma-Cassini². De surcroît, si j'enseigne ces résultats de la recherche dans différents DEA et DESS, et que j'encadre des élèves, c'est moins en agronomie qu'en géographie ou en informatique³.

ESPACE \ TEMPS	Entités d'un espace partitionné (contraintes topologiques)	Entités localisées (pas de contraintes)
Permanence des Identifiants	VIE Entités fixes	MOUVEMENT Entités déformables
Filiation des Identifiants	GENEALOGIE Entités modifiables	Entités transformables

Figure 6. Tableau des entités et des filiations.

La seconde étape consiste à simuler la dynamique d'embroussaillement

Quelles sont les trajectoires d'évolution des systèmes techniques ? Quelles sont les interactions entre la dynamique de végétation et la dynamique de pâturage ? Comment les activités d'élevage produisent-elles du paysage ?

Nous avons élaboré plusieurs modèles de simulation au cours de différents programmes de recherche pluridisciplinaires. Nous avons confronté différents points de vue disciplinaires pour élaborer progressivement des réponses adaptées à l'évolution des problématiques. Les acquis de l'étape précédente ont été mobilisés pour

2. Le groupement de recherche Cassini a fonctionné de 1992 à 2000. Il nous a fourni l'occasion de travailler en interdisciplinarité sur la représentation de l'espace et du temps dans les SIG (Cheylan *et al.*, 1999). Depuis 2000, les journées annuelles de la recherche Cassini balisent les avancées du groupement de recherche Sigma. Voir : www.cassini2001.teledetection.fr/programme.html et www.ur079.ird.fr/archives/colloques/2002/coll-2002.html (02-2006).

3. DEA Structures et dynamiques spatiales (Avignon), Mutations spatiales (Montpellier), DESS Informatique appliquée aux organisations (Montpellier).

faciliter l'anticipation et l'intégration. En effet, conformément à nos objectifs d'agronomes, nos simulations n'ont pas pour but de reproduire une dynamique passée, mais d'imaginer des scénarios futurs possibles à partir des configurations spatiales et des dynamiques actuelles de la végétation, combinées à des modes d'organisation des pratiques adaptées aux logiques de production des éleveurs. De même, elles ne cherchent pas à caractériser la plus petite entité élémentaire, mais considèrent les entités spatiales qui ont du sens soit par rapport à la dynamique de végétation, comme par exemple les unités de végétation en bois, landes ou pelouses, soit par rapport aux dynamiques de pâturage, comme les blocs de parcelles, les parcelles ou les unités pâturées, selon le niveau de prise en compte par les éleveurs.

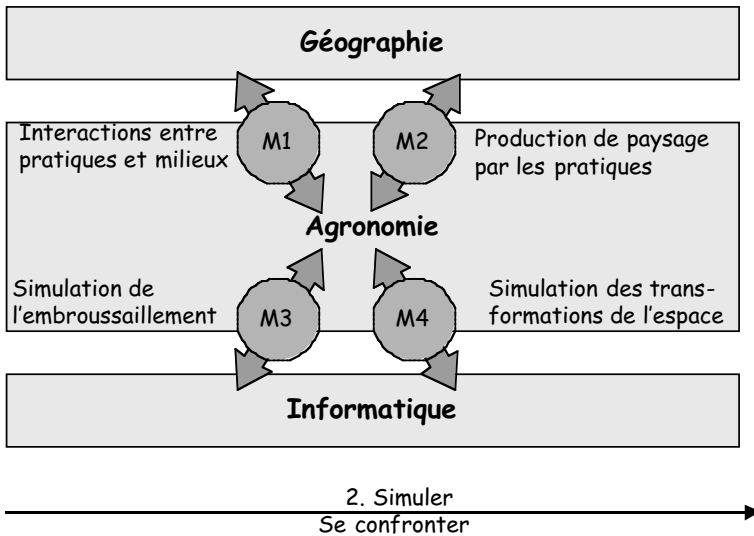


Figure 7. Seconde étape.

Les simulations ont permis d'expérimenter et de tester des hypothèses. Confrontés aux autres disciplines, nous avons mieux argumenté nos raisonnements sur les dynamiques d'embroussaillage et évalué les évolutions possibles du paysage. Nous avons transformé nos oppositions et divergences en propositions et dépassements, par l'intermédiaire des modèles de simulation que nous avons élaborés ensemble, sur des objets communs que nous avons progressivement transformés.

Avec la géographie des milieux, l'opposition a principalement porté sur le sens du questionnement à poser. Le programme de recherche du PIR Environnement du CNRS analysait les interactions entre « Usage des sols, pratiques des éleveurs, représentations de la nature et dynamique des milieux et des ressources »⁴. Plutôt que l'impact des pratiques sur la végétation, nous avons pris en compte l'hétérogénéité

4. Responsables : M. Cohen et S. Lardon, 1992-1995.

de la végétation dans l'organisation des pratiques. Plutôt que la recherche de corrélations entre évolution des pratiques et évolution des milieux nous avons caractérisé les pratiques et les milieux ainsi que leurs interactions au cours du temps, au niveau de l'exploitation. Nous avons montré la diversité des pratiques et des réponses apportées par les exploitants au problème d'embroussaillage (Cohen, 2003). Il n'y a pas qu'un seul modèle d'exploitation possible et l'impact est différencié selon les modes de conduite et les modes d'organisation des systèmes techniques.

Avec la géographie des comportements, l'opposition a porté sur les entités de base à considérer. Dans le programme de recherche Archaeomedes⁵ « *Policy-relevant models of the natural and anthropogenic dynamics of degradation and desertification and their spatio-temporal manifestations* », nous avons étudié la production de paysage par les pratiques agricoles. Or l'équipe de géographes suédois se référait à la *Time-geographie*, qui suit les individus dans le temps et dans l'espace, alors que les agronomes français se référait à la *farming System Research*, pour formaliser des activités dans le temps et dans l'espace pour des entités agrégées. Nous avons utilisé un modèle de micro-simulation aux niveaux où s'organisent les activités agricoles, les trajectoires d'évolution des systèmes techniques, les changements de génération d'exploitants, les lieux-dits où sont localisées les exploitations. Nous avons ainsi simulé des réponses différenciées, en fonction des logiques des exploitants, aux politiques agricoles et à la fermeture des paysages, (Oberg *et al.*, 2000).

Avec la statistique stochastique, dans l'AIP Inra-Ecospace⁶ « Embroussaillage des parcours et pratiques pastorales dans les montagnes sèches du Sud de la France. Vers une modélisation de la dynamique d'embroussaillage », les divergences ont également porté sur les niveaux d'organisation à considérer. En nous appuyant sur la grille de croisement espace-temps (Faivre *et al.*, 1999), nous avons considéré plusieurs niveaux de prise en compte des phénomènes : le niveau très local, de l'ordre de la placette, pour combiner les paramètres biologiques de diffusion du buis, un niveau plus large, de l'ordre du bloc de parcelles, pour combiner les paramètres du milieu physique et les pratiques pastorales. Le modèle de simulation des processus ponctuels a été appliqué à des taches, correspondant aux buissons de buis, en distinguant leur mode de répartition initiale, en linéaire le long des limites de parcelles, en rond dans les pierriers ou en semis dans les affleurements rocheux. Nous avons mis en évidence des effets de saturation à l'échelle des parcelles et des évolutions différenciées selon les configurations initiales (Lardon *et al.*, 2003).

Avec l'informatique distribuée, dans le réseau des Systèmes multi-agents spatialisés⁷ les divergences ont porté sur les objectifs de la simulation. Il ne s'agissait pas de faire émerger des comportements nouveaux des agents dans des organisations (Fer-

5. Responsable : S. Van Der Leeuw, 1996-1999.

6. Responsable : J. Chadœuf, 1995-1998.

7. Réseau constitué à partir de 1997, autour de la plate-forme Cormas, du Cirad-Tera. Voir <http://cormas.cirad.fr/indexeng.htm> (02-2006).

ber et Gutknecht, 1998), ni même de suivre les dynamiques d'agents situés (Bousquet *et al.*, 2001), mais de générer des organisations spatiales, de façon à assurer la filiation des objets et de leurs caractéristiques dans l'espace (Lardon *et al.*, 2000). Le modèle de simulation Forpast (Bommel et Lardon, 2000) a validé nos hypothèses agronomiques. Il est nécessaire d'adapter les pratiques à la vitesse d'évolution de la végétation, la même stratégie obtenant des résultats différents selon l'état initial d'embroussaillage. Les pratiques ciblées mais agrégées sont plus efficaces que les pratiques uniformes ou élémentaires, pour garder une certaine ouverture du paysage.

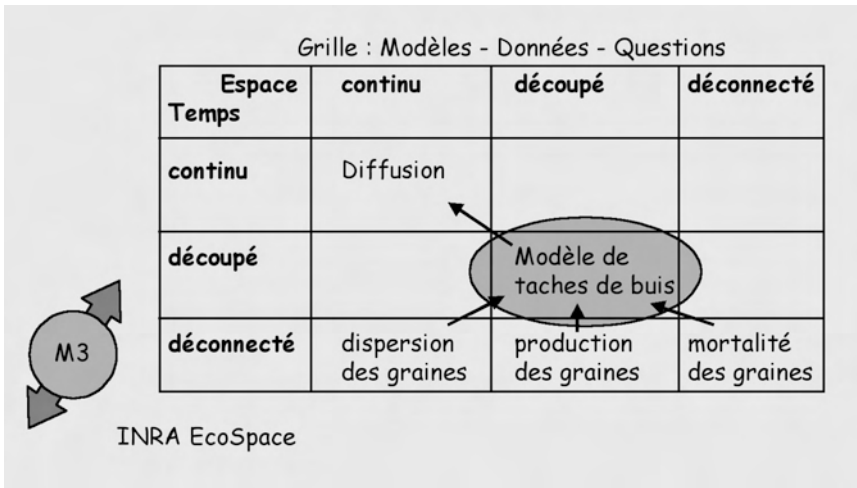


Figure 8. Modéliser la dynamique d'embroussaillage du buis.

La question initiale portait sur le processus de diffusion de l'embroussaillage (temps et espace continus). Les données écologiques disponibles concernaient des données échantillonnées dans le temps (temps déconnecté) : dispersion des graines (continu dans l'espace), production des graines (découpé dans l'espace) et mortalité des graines (déconnecté dans l'espace). C'est en combinant ces données écologiques dans un modèle statistique de taches de buis (modèle de simulation découpé dans le temps et dans l'espace) qui nous avons pu donner une réponse à la question initiale. Ce modèle s'interprète aussi en fonction des pratiques pastorales (connecté dans le temps et dans l'espace).

Les modèles de simulation servent ici à explorer le champ des possibles. Ils ne font pas le tour d'une problématique, mais instruisent plus spécifiquement une question, qui n'est pas obligatoirement celle avancée au début de la recherche. Ainsi, c'est plus dans la démarche de modélisation elle-même que dans chaque modèle pris séparément ; c'est plus dans les écarts aux modèles que dans le modèle lui-même que l'on produit des réponses aux questions posées (Durand-Dastès, 1992). Souvent, un modèle sert à mieux formuler le problème, à tester les limites des concepts mobilisés, à cibler les données à recueillir et les conditions initiales à considérer. Les modèles sont le support d'une approche plus qualitative que quantitative, mais qui aide à définir les ordres de grandeurs des phénomènes observés et à hiérarchiser les facteurs à prendre en compte. On se retrouve bien dans la même situation que celle décrite par Godard et Legay (1992b) : « Les démarches recourent

à des modèles qualitatifs, des schémas et des diagrammes fléchés, des protocoles communs de recueil et de codage de l'information, des cadres comptables. Des modèles spécialisés à l'interdisciplinarité limitée sont plus en prise avec les besoins de la recherche qu'une modélisation globale interdisciplinaire quantifiée. » Cependant, l'articulation de ces modèles dans un itinéraire méthodologique permet de franchir un pas de plus. Il s'avère que les modèles servent à se valider l'un l'autre, les conclusions de l'un servant d'hypothèse à tester pour le second, les résultats du troisième ne prenant leur sens qu'avec le parti-pris du quatrième...

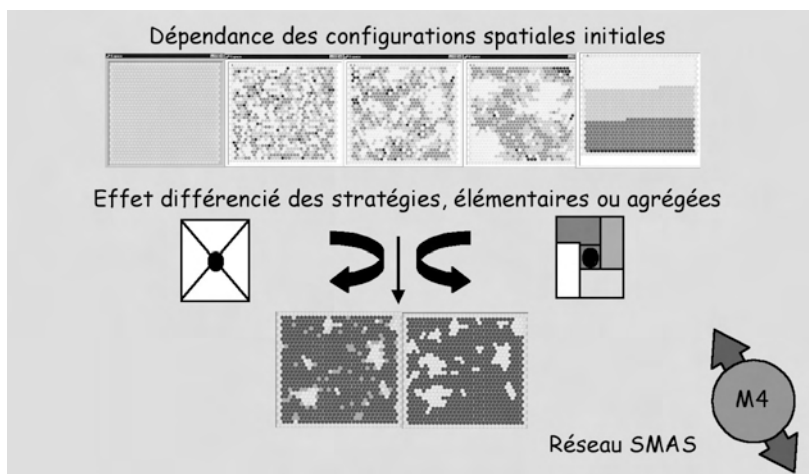


Figure 9. Modéliser les interactions embrousaillement-pâturage.

Les configurations initiales de la végétation ont été simulées selon des lois mathématiques : distribution des indices de végétation entre 1 et 30, répartition uniforme, aléatoire, en agrégat de taille 4, en agrégat de taille 12, en plaque. Les stratégies de pâturage ont également été simulées, par exemple par une répartition aléatoire pour la stratégie radiale ou une répartition plus forte et ciblée sur les pelouses pour la stratégie en mosaïque (cf. référence aux chorèmes de la figure 3). Les configurations spatiales après 50 pas de simulation dépendent de l'interaction entre configuration initiale et stratégie, les stratégies agrégées (en mosaïque) maintenant mieux les zones ouvertes.

La troisième étape est la traduction des formes d'organisation

Comment donner à voir les logiques des exploitations agricoles ? Quelles explications sont associées aux modalités de gestion de l'espace ? Comment aider les agriculteurs à s'adapter aux changements ?

Le langage graphique des chorèmes rend compte des principes organisateurs de l'espace et met en évidence les logiques et les cohérences techniques. La méthodologie orientée objet donne les outils de formalisation des processus et d'analyse des dynamiques. Les modèles de simulation font émerger progressivement les niveaux d'organisation pertinents et le moyen de passer de l'un à l'autre pour rendre compte des phénomènes. Il reste à rendre intelligible à d'autres ces formes d'organisation et de transformation de l'espace. Nous le faisons dans deux types de dispositifs d'apprentissage collectif, la formation et la conception.

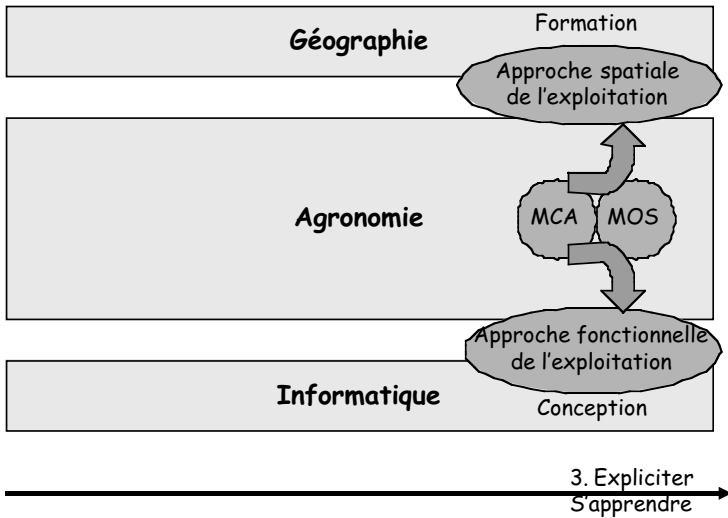


Figure 10. Étape 3.

Nous proposons un outil pédagogique à destination en particulier des enseignants de lycées agricoles, pour une approche globale de l'exploitation agricole prenant en compte les dimensions spatiales. La traduction d'une méthode de recherche en une méthode opérationnelle pour la formation et l'action dépend en grande partie de la capacité à créer des ponts entre disciplines et entre praticiens (Lardon *et al.*, 2002). Nous avons trouvé auprès des formateurs du CEP de Florac les bons interlocuteurs pour produire un guide méthodologique sur l'approche spatiale de l'exploitation agricole (Naïtlho *et al.*, 2003). Des sessions de formation sont maintenant proposées aux formateurs et acteurs du développement agricole.

Nous utilisons un outil cognitif, pour échanger entre disciplines agronomique et informatique, par l'intermédiaire du langage graphique des chorèmes et des graphes (Capitaine *et al.*, 2001). Les chorèmes fournissent une interprétation fonctionnelle aux organisations spatiales. Les graphes facilitent la comparaison des exploitations agricoles par reconnaissance des formes d'organisation et attribution des explications associées. Les interactions entre disciplines et points de vue se jouent dans ce dialogue entre différentes formes d'acquisition de connaissances (Brassac et Grégori, 2000). Dans cette activité de conception, les objets graphiques constituent des objets intermédiaires (Vinck, 1999). Nous les analysons dans différents itinéraires méthodologiques en nous interrogeant sur les fonctionnalités des NTIC pour accompagner ces apprentissages collectifs⁸.

Cette démarche de recherche exige d'explicitier nos modèles sous-jacents, d'assurer la traduction entre différents langages, de déconstruire et de reconstruire nos

8. Programme CNRS « Société de l'information », projet JOYSTIC « Usage raisonné des représentations spatiales comme objets intermédiaires dans des projets de développement participatif » (responsable S. Lardon, 2002-2004).

représentations. Elle produit de nouveaux objets, à l'interface entre plusieurs disciplines. On peut considérer qu'elle apporte des réponses opératoires. Elle est reproductible, enseignable et appropriable par d'autres. Elle participe d'une géo-agronomie en émergence. Jean-Pierre Deffontaines (1998) la définit comme : « un ensemble de questions sur l'articulation entre des faits techniques et des faits spatiaux. Son but est d'étudier la façon dont les agriculteurs présents sur un territoire organisent les occupations du sol et les usages en fonction d'objectifs propres à chaque exploitation et des interactions avec les autres exploitations et avec les autres modes d'usage du territoire. » Muriel Bonin (2003) y contribue dans sa thèse qui manie l'ensemble des concepts, outils et méthodes présentés ici, pour articuler niveaux d'organisation, approches spatiale et fonctionnelle, matérialités et représentations de l'espace. Pour elle :

la géo-agronomie ne peut pas se limiter à la spatialisation des pratiques, à la prise en compte de la répartition spatiale des systèmes de culture et à leurs coordinations, ni se limiter à la seule production agricole. Des niveaux d'organisation supérieurs sont nécessaires afin d'appréhender les liens entre agriculteurs et autres usagers de l'espace, la place de l'agriculture dans les projets de territoire, les facteurs économiques et politiques. Ces niveaux supérieurs peuvent conduire à reconsidérer les analyses conduites aux niveaux les plus fins...

Patrick Caron (2002) établit une typologie des approches agronomiques et définit l'agronomie territoriale comme :

l'analyse de la contribution du fait technique, comme processeur de changement, à la production du territoire. L'agronome intégrateur territorial élabore les cadres d'analyse régionale, identifie les niveaux d'organisation qui ont du sens et hiérarchise les moyens d'action faisant le lien entre processus biophysiques, procédures techniques et dynamiques sociales.

Espérons que les agronomes sauront s'engager, avec d'autres, dans cette ouverture aux problématiques territoriales.

RETOUR SUR DES PRATIQUES INTER-DISCIPLINAIRES

Mon itinéraire de recherche a croisé plusieurs disciplines, avec lesquelles j'ai interagi différemment, selon les moments de la démarche et les buts à atteindre. Les relations avec les autres disciplines sont de plusieurs ordres, elles ne sont pas établies une fois pour toutes et répondent à des fonctions spécifiques qui correspondent ici aux trois étapes de la démarche.

Tout d'abord, il s'agit d'aller chercher des concepts dans d'autres disciplines pour les adapter à une problématique spécifique. Cela demande des capacités d'identification, de classement générique des problèmes et de conceptualisation suffisante pour trouver les analogies, au delà de la différence des informations à traiter. Cependant, le fil directeur doit être ancré dans une discipline bien identifiée, ici l'agronomie, et s'inscrire dans le temps long de l'élaboration de concepts.

Ensuite, une fois établie l'orientation de la recherche, il s'agit de la confronter à d'autres points de vue disciplinaires, pour un enrichissement mutuel ou un appro-

fondissement justifié. Cela demande des capacités d'argumentation, d'explicitation, pour ne pas en rester aux contradictions apparentes, mais les assumer et pour mieux jouer sur les synergies possibles. L'utilisation des modèles permet d'articuler ces points de vue et d'interagir autour d'objets construits en commun.

Enfin, lorsque le raisonnement prend de la consistance, qu'il paraît cohérent et pertinent, la mise à l'épreuve se fait par la mise à disposition des concepts et des méthodes dans des dispositifs adaptés de formation ou de conception collaborative. Cela demande des capacités d'hybridation, de conceptualisation pour passer d'une discipline à l'autre. Les outils produits dépassent les disciplines et s'inscrivent dans l'action.

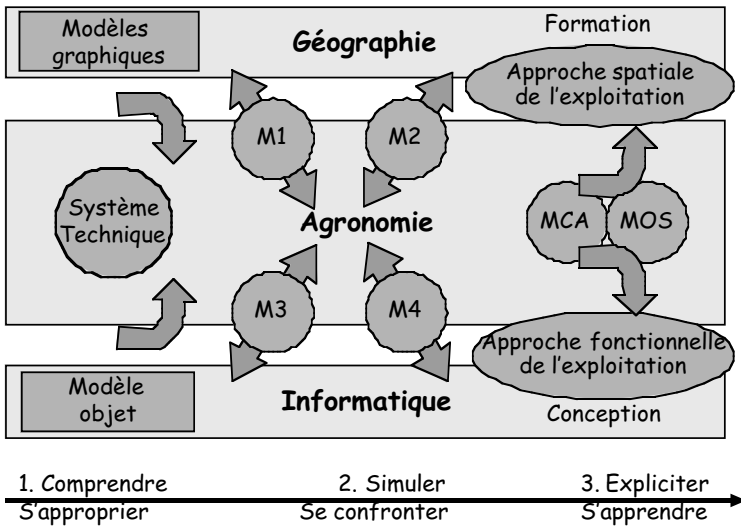


Figure 11. La démarche de modélisation.

De cette expérience, on peut retenir trois enseignements, concernant le temps, les modèles et les dispositifs, qui interrogent nos pratiques interdisciplinaires :

- le temps : ce type de recherche s'inscrit dans la durée, avec ses temps forts et ses moments de ralenti, qui ne sont pas pour autant des moments perdus. Il y a des rythmes à respecter, en particulier celui du terrain qui lui-même évolue. Les problématiques changent, les outils d'analyse aussi. Ainsi, la problématique de l'embroussaillage n'était pas explicitement présente au début de la recherche, elle s'est construite progressivement, en partie alimentée par les premiers résultats. De même, l'enjeu d'une lisibilité des pratiques agricoles a émergé récemment, suite aux crises agricoles de ces dernières années et l'action de rendre intelligibles les pratiques que nous observions s'est révélée indispensable. Pourtant, la recherche se doit d'anticiper et d'accompagner le changement. On peut se demander s'il ne conviendrait pas d'imaginer des programmes de recherche interdisciplinaires, avec une contribution des disciplines décalées dans le temps, d'inventer un système de relais où l'instruction d'une question de recherche serait façonnée progressivement par des

sciences complémentaires et serait mise régulièrement en débat. Cela éviterait une focalisation trop rapide sur une question commune qu'il est difficile de faire émerger d'un collectif aux disciplines contrastées et mettrait en perspective les préoccupations des uns et des autres, par la confrontation aux réalités de terrain ;

– les modèles : ils ne sont pas statiques mais ne couvrent pas non plus toute l'étendue du champ de recherche. Ils servent à construire de nouveaux objets, à faire émerger de nouvelles questions et de nouvelles hypothèses. Ainsi, l'embroussaillage a tour à tour été vu comme un processus contraint, le résultat d'une production, dépendant de configurations initiales, générateur de formes maîtrisables. Un seul modèle ne peut en rendre compte, il convient d'articuler des modèles, de les combiner dans le temps pour valoriser progressivement les acquis. Dans les recherches interdisciplinaires, il faudrait donner aux modèles le rôle d'objets intermédiaires, appropriables par chaque discipline et transformés par chacune d'elle. La confrontation ne se ferait pas par opposition de concepts ou divergence de méthodes, mais par construction progressive d'artefacts qui, par leur consistance, obligeraient à argumenter et à affiner les raisonnements. La modélisation serait alors l'invention d'un langage de formes, une sorte d'ingénierie de la connaissance s'appliquant à des objets modulables et modelables ;

– les dispositifs : le rôle des disciplines n'est pas identique, ni dans les rapports des unes aux autres, ni par rapport aux différents moments de la recherche. Le cadre institutionnel varie également. Ainsi, si l'exploration de nouveaux concepts peut se faire dans un dispositif souple de séminaires croisés, la confrontation des méthodes nécessite un programme plus pérenne ; si les échanges sont facilités dans les réseaux, la concrétisation se fait dans des groupes de travail plus ciblés. Les dispositifs sont donc à construire et à adapter aux nécessités de la recherche. Faut-il passer des contrats entre disciplines, généraliser les appels d'offres, inventer de nouvelles règles du jeu ? Il existe des analogies entre le processus de construction d'un projet de recherche et celui de la conception d'un projet de territoire. Ce dernier a été impulsé par les politiques publiques, il fait l'objet de procédures institutionnelles faisant la part des initiatives locales, il s'inscrit dans la durée et prépare les innovations de demain. De même que le territoire fait émerger de nouveaux acteurs, de nouveaux usages, de nouvelles activités, de même nous devons renouveler nos pratiques interdisciplinaires en faisant émerger de nouveaux objets, de nouveaux modèles, de nouvelles représentations.

Mes recherches portent maintenant sur les représentations spatiales pour le développement territorial (Lardon *et al.*, 2001b). Cette expérience sur la problématique de l'embroussaillage m'a beaucoup apporté, tant pour l'apprentissage de pratiques interdisciplinaires que pour la capacité de prise de recul et de mise à l'épreuve. Les compétences qui m'ont permis de mener à bien cette progression, je les ai acquises initialement dans le champ des sciences de la vie, au sein desquelles j'ai été formée à la diversité du vivant et à la modélisation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BOMMEL P., LIBOUREL T., LARDON S., 2000, *Conception objet dans le cadre des systèmes d'information spatiaux. Agrégation spatiale et généralisation*, Conférence Inforsid, Lyon, Mai 2000, 14 p.
- BOMMEL P. & LARDON S., 2000, Un simulateur pour explorer les interactions entre dynamiques de végétation et de pâturage. Impact des stratégies sur les configurations spatiales, *Revue internationale de géomatique* (n° spécial « SIG et simulations »), 10, 2000/1, p. 107-130.
- BONIN M., LARDON S., 2002, Recomposition des exploitations agricoles et diversification des pratiques de gestion de l'espace, 23 p., *Étud. Rech. Syst. Agraires Dév.*, 33, p. 133-150.
- BONIN M., 2003. *Inscription territoriale des recompositions agricoles. Caractérisation et modélisation dans les Monts d'Ardeche*, Doctorat de géographie, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, 602 p.
- BOUSQUET F., LE PAGE C., BAKAM I. AND TAKFORYAN A., 2001, A spatially explicit individual-based model of blue duikers population dynamics: multi-agent simulation of bushmeat hunting in an eastern cameroonian village, *Ecological Modelling*, 138 (1-3), p. 331-346.
- BRASSAC CH. ET GRÉGORI N., 2000, Situated and Distributed Design of a Computer Teaching Device, *Journal of Design Sciences and Technology*, Vol. 8, n° 2, p. 11-31.
- BRUNET R., 1986, La carte-modèle et les chorèmes. *Mappemonde* 86/4, p. 3-6.
- CARON P., 2002, Quels agronomes pour quels territoires ? Interstices d'une ambition intégratrice ou perspectives d'un projet unifié ? *Agronomes et territoires* (2^e Journées Olivier de Serres, Le Pradel 12-13 septembre 2002), 21 p.
- CAPITAINE M., LARDON S., LE BER F., METZGER J. L., 2001, Chorèmes et graphes pour modéliser les interactions entre organisation spatiale et fonctionnement des exploitations agricoles, in LIBOUREL T. & MAUREL P. (eds) *Géomatique et espace rural* (Journées de la recherche Cassini, Montpellier, 25-27 Septembre 2001), Montpellier, Cirad, p. 145-163.
- CHEYLAN J. P., GAUTIER D., LARDON S., LIBOUREL T., MATHIAN H., MOTET S., SANDERS L., 1999, Les mots du traitement de l'information géographique, *Rev. Internat. Géomatique*, 99/1, p. 11-23.
- COHEN M. (dir.), 2003, *La brousse et le berger. Une approche interdisciplinaire de l'embranchement des parcours*, Paris, CNRS Éditions, coll. « espaces et milieux ».
- DEFFONTAINES J. P., 2001, Introduction. Une agronomie en questionnement. Les entretiens du Pradel, 1^{re} édition Autour d'Olivier de Serres : Pratiques agricoles et pensées agronomiques, Partie Agronomique. *C. R. Acad. Agri*, n° 2001-4, p. 115-119.
- DEFFONTAINES J. P., CHEYLAN J. P. & LARDON S., THÉRY H., 1993, Managing rural areas. From practices to model, in BROSSIER J., DE BONNEVAL L. & LANDAIS E. (eds), *Systems studies in agriculture and rural development*, Paris, INRA Éditions, coll. « Science Update », p. 383-392.
- DEFFONTAINES J. P., 1998, Enjeux spatiaux en agronomie, *Les sentiers d'un geoagronome*, Arguments Éditions, coll. « Parcours et paroles », p. 64-71.
- DURAND-DASTÈS F., 1992, Les modèles en Géographie, in BAILLY, FERRAS, PUMAIN (dir.), *Encyclopédie de la géographie*, Paris, Economica.
- FAIVRE R., LARDON S., MONESTIEZ P., TRIBOULET P., 1999, Formalisme M-D-Q pour les processus spatio-temporels, *Rev. Internat. Géomatique*, 99/1, p. 101-121.
- FERBER J., GUTKNECHT O., 1998, A metamodel for the analysis and design of organizations in multi-agent systems, *Third International Conference on Multi-Agent systems*, (ICMAS'98) Proc., p. 128-135, IEEE Computer Society.
- GODARD O. & LEGAY J. M., 1992a, Entre disciplines et réalités, l'artifice des systèmes, in JOLLIVET M. (dir.), *Sciences de la nature, sciences de la société. Les passeurs de frontières*, Paris, CNRS Éditions, p. 243-257.

- GODARD O. & LEGAY J. M., 1992b, Modélisation et simulation : une approche de la prédictivité, in JOLLIVET M. (dir.), *Sciences de la nature, sciences de la société. Les passeurs de frontières*, Paris, CNRS Éditions, p. 491-507.
- LANDAIS E., 1998, Agriculture durable : les fondements d'un nouveau contrat social, *Le courrier de l'Environnement*, Paris, INRA, 33, p. 5-22.
- LARDON S., DEFFONTAINES J.-P., BAUDRY J., BENOÎT M., 1990, L'espace est aussi ailleurs, in BROSSIER J., VISSAC B. & LE MOIGNE J.-L. (dir.), *Modélisation systémique et système agricole. Décision et organisation*, Paris, INRA-SAD, p. 321-337.
- LARDON S., 1999, *Modélisation spatiale des dynamiques territoriales*, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches en Biométrie, Université Cl. Bernard, Lyon I, Mémoire 105 p. + Dossier 27 p. + Illustrations 25 p.
- LARDON S., LIBOUREL T., CHEYLAN J. P., 1999, Représentation du changement : conceptualiser la dynamique des entités spatio-temporelles, *Rev. Internat. Géomatique*, 99/1, p. 45-65.
- LARDON S., BOMMEL P., BOUSQUET F., LE PAGE C., LIBOUREL T., LIFRAN R., OSTY P. L., 2000, De la simulation de l'embroussaillage à un outil d'aide à la gestion de l'espace. Un modèle de transformation de l'espace, in S. PESTY & C. SAYETTAT-FAU, 8^e Journées JFIADSMSA, Saint-Jean sur Vêre, 2-4 Octobre 2000, Paris, Hermès Sciences Publications, p. 357-374.
- LARDON S., DEFFONTAINES J. P., OSTY P. L., 2001a, Pour une agronomie du territoire : prendre en compte l'espace pour accompagner le changement technique. Les entretiens du Pradel, 1^{er} édition Autour d'Olivier de Serres : Pratiques agricoles et pensées agronomiques, Partie Agronomique, *C. R. Acad. Agri*, n° 2001-4, p. 187-198.
- LARDON S., MAUREL P., PIVETEAU V. (dir.), 2001b, *Représentations spatiales et développement territorial*, Paris, Éditions Hermès, 437 p + cahier couleur 26 p.
- LARDON S., OSTY P.-L., NAÏTLHO M., CAPITAINÉ M., PIVETEAU V., 2002, Comprendre l'organisation spatiale des exploitations et des territoires : une recherche/formation, *Agronomes et territoires*, 2^e Journées Olivier de Serres, Le Pradel 12-13 septembre 2002.
- LARDON S., TRIBOULET P., CHADOEUF J., DUVERNOY I., LEPART J., OSTY P.-L., ROUSSET O., 2003, Embroussaillage des parcours : observation et simulation de la progression du buis entre 1948 et 1989. Analyse critique, in MONESTIEZ P., LARDON S. & SEGUIN B. (dir.), 2004, *Organisation spatiale des activités agricoles et processus environnementaux*, Paris, INRA Éditions.
- LEGAY J. M., 1986, Méthodes et modèles dans l'étude des systèmes complexes, *Cahiers de la recherche développement*, 11, p. 1-6.
- LE MOIGNE J. L., 1990, *La modélisation des systèmes complexes. Afcet Systems*, Paris, Dunod, 178 p.
- NAÏTLHO M., LARDON S., 2000, Representing spatial organisation in extensive livestock farming, *Integrating Animal Science Advances into the Search of Sustainability*, 5th Inter. Livestock Farming Systems Symposium, Posieux (Fribourg), Switzerland, 19-20 August 1999, p. 187-190.
- NAÏTLHO M., LARDON S., YOTTE M., 2003, *Approche spatiale de l'exploitation agricole. Modélisation de l'organisation spatiale d'une exploitation. Livret méthodologique*, Dijon, Educagri Éditions, 111 p.
- OBERG S., LARDON S., HOLM E., MATTSON K., OSTY P.-L., GAUTIER D., DUVERNOY I., TRIBOULET P., LHUILLER C., O'ROURKE E., 2000, Landscape production and farming practices: simulating micro-processes on the Causse Méjan (France), in VAN DER LEEUW S. E., GARENNE-MAROT L., (eds.), *Policy relevant models of the natural and anthropogenic dynamics of degradation and desertification and their spatio-temporal manifestations*. Draft final report of the Archaeomedes II research project submitted to DG XII of the European Commission.
- OSTY P. L., 1994, The farm enterprise in its environment. proposals for structuring an appraisal of strategy, in BROSSIER J., BONNEVAL L. DE & LANDAIS E. (eds), *Systems studies in agriculture and rural development*, Paris, INRA Éditions, coll. « Science Update », p. 259-268.

- OSTY P. L., LARDON S., DE SAINTE-MARIE C., 1998, Comment analyser les transformations de l'activité productive des agriculteurs : propositions à partir des systèmes techniques de production, *Étud. Rech. Syst. Agraires Dév.*, 31, p. 397-413.
- OSTY P. L., LARDON S., 2000, Livestock rearing modes to characterize the long-term change in sheep farming in less-favoured areas, *Integrating Animal Science Advances into the Search of Sustainability*, 5th Inter. Livestock Farming Systems Symposium, Posieux (Fribourg), Switzerland, 19-20 August 1999, p. 194-197.
- PAPY F., 2001, Pour une théorie du ménage des champs : l'agronomie des territoires. Les entretiens du Pradel, 1^o édition Autour d'Olivier de Serres : pratiques agricoles et pensées agronomiques, Partie Agronomique, *C. R. Acad. Agric.*, n° 2001-4, p. 139-149.
- SEBILLOTTE M., 2001, Des recherches en partenariat « pour » et « sur » le développement régional à l'Inra, *Économie Rurale*, n° 261, p. 50-53.
- VINCK D. (dir.), 1999, *Ingénieurs au quotidien. Ethnographie de l'activité de conception et d'innovation*, Grenoble, PUG, 232 p.

Chapitre 9

Intégrer les analyses géographiques, écologiques et sociales pour gérer la faune sauvage*

103

Les rapports entre les animaux sauvages et l'Homme ont changé depuis quelques décennies. Que ce soit pour les protéger ou bien pour les éliminer, les conflits entre intérêts et perceptions des problèmes rendent toute action délicate et mécontentent généralement une partie de la population ; par exemple, la destruction des étourneaux dommageables à l'agriculture a fait réagir de nombreux citoyens et la protection des loups a fait réagir de nombreux éleveurs. Pour prendre des décisions d'action, il faudra donc tenir compte de ces conflits latents mais aussi des volontés récentes de durabilité et de cohérence des stratégies et des méthodes, que ce soit pour favoriser des espèces ou des populations (espèces patrimoniales, lutte biologique, etc.) ou bien pour en limiter d'autres ayant des impacts négatifs sur les activités humaines, sur la santé animale ou humaine ou sur la biodiversité.

Dans le cas de gestion d'espèces dont il faut limiter les effets, et que nous qualifions « à risques » (Clergeau, 1997), l'expérience montre que l'évaluation du problème et les prises de décision qui en découlent sont particulièrement délicates du fait (1) d'une appréciation non consensuelle des problèmes par les différents acteurs (ceci est très fort pour des animaux emblématiques comme certains mammifères et la plupart des oiseaux), (2) du manque de connaissance sur les dynamiques de fonctionnement des populations (notamment sur les flux d'individus dans les paysages) et sur les contextes et contraintes sociologiques, et (3) de l'absence d'outil qui permette à la fois une intégration des évaluations disciplinaires (géographie, sociologie, écologie, épidémiologie, etc.) et une communication interdisciplinaire dans un objectif d'aide à la décision collective.

Notre démarche d'écologues a été de dépasser la seule production de connaissances spatialisées sur les espèces que nous étudions en cherchant à les repositionner dans un contexte de données pluridisciplinaires nécessaires à la production d'une aide à la décision la plus consensuelle possible et la plus efficace parce que prenant en compte un maximum de paramètres. Notre passage d'une collaboration pluridisciplinaire à une réflexion interdisciplinaire est donc intimement lié à une recherche-action dans un objectif d'amélioration des communications entre acteurs et de réponse aux attentes concrètes des gestionnaires. Nous illustrerons cette démarche,

* Chapitre rédigé par Philippe CLERGEAU, Gwénaëlle LE LAY et Isabelle MANDON-DALGER

premièrement en présentant comment cette pratique de valorisation de résultats obtenus sur des oiseaux ravageurs des cultures ont défini un ensemble d'objectifs indispensables à une prise de décision collective et, deuxièmement, comment nous avons été jusqu'à proposer un protocole d'analyse de données pluridisciplinaires fondé sur un support cartographique dans le cas particulier de la gestion de la faune sauvage urbaine.

VERS LA FORMALISATION DES GROUPES MULTI-ACTEURS

Parmi les différents cas que nous avons eu à analyser et pour lesquels nous avons à la fois effectué des recherches en biologie de population animale, parfois provoqué des études sociologiques, et souvent participé aux commissions décisionnelles, nous présenterons le cas de deux ravageurs de cultures, l'Étourneau sansonnet et le Bulbul orphée. Le premier cas a permis l'émergence d'idées méthodologiques dont la mise en oeuvre pouvait contribuer à l'aide à la décision multi-acteurs. Le deuxième a permis de tester l'applicabilité de certaines de ces idées.

Exemple de l'étourneau dans l'Ouest de la France

L'étourneau sansonnet, *Sturnus vulgaris*, a été le premier oiseau ravageur de cultures en Europe et aux États-Unis (introduit à la fin du XIX^e siècle) dans les années soixante-dix et quatre-vingt. Il consomme les semis de céréales, et le grain du maïs-fourrage en silos, dégrade les bois et haies où il dort, et a été longtemps suspecté de transmettre des maladies au bétail (voir synthèses in Clergeau, 1997). Les différents travaux que nous avons menés sur cet oiseau ont permis de suggérer la mise en place d'autres procédures de gestion que la destruction massive de cet oiseau, méthode qui montrait ses limites d'application et de résultat (Clergeau, 1990). Ainsi une des alternatives était de construire une nouvelle relation étourneau/agriculture et de s'engager dans la voie d'une gestion intégrée (Clergeau, 1997). Ceci ne pouvait se faire (1) qu'en réalisant un suivi spatial et temporel des populations d'étourneaux hivernants¹ et en proposant un zonage des secteurs à risques, (2) qu'en suggérant un usage raisonné des méthodes et outils disponibles pour faire fuir les étourneaux et en construisant une planification spatiale de sites d'accueil de dortoir, et (3) qu'en développant une recherche de solution agronomique ou paysagère, envisageant notamment de supprimer ou limiter l'accès des oiseaux aux ressources, qu'elles soient alimentaires ou pour dormir. Une analyse des facteurs prenant en compte les niveaux spatiaux d'organisation écologique (région, paysage, parcelle, station) a fait ressortir l'intérêt de recherches complémentaires au niveau du paysage qui apparaissait comme un niveau fonctionnel peu connu et pourtant indispensable à une maîtrise des impacts de cet oiseau dans l'Ouest de la France (Clergeau, 1995). C'est d'ailleurs en travaillant sur ce niveau paysage que la notion et l'intérêt de site d'accueil de dortoir ont pris toute leur signification.

1. C'est en hiver, lors de la présence des migrateurs venus du nord, que les dégâts sont les plus significatifs.

Malgré la mise en évidence de ces niveaux fonctionnels et l'intérêt de leur prise en compte dans les actions de gestion, l'exposé et la valorisation de ces résultats se sont heurtés à une réelle difficulté de communication et d'intégration des résultats vis-à-vis de la profession agricole qui subissait des dégâts forts, notamment en Bretagne (plus de 23 millions d'étrourneaux en hiver en Bretagne au début des années quatre-vingt). De plus, les décisions que devaient prendre le ministère de l'agriculture et les groupes de travail en protection des cultures subissaient une pression forte de la part des citoyens et des médias qui tendaient à remettre en cause les actions de destruction massive par produit chimique qui étaient pratiquées (Clergeau, 1990). Ce contexte rendait difficile toute information et décision collective et nécessitait des outils de mise à plat des données, qu'elles soient d'origine biologique, économique ou sociétale.

À l'issue de cette première implication dans une gestion multi-acteurs, nos conclusions étaient donc que, pour une plus grande efficacité de la prise de décision, il était indispensable (1) de construire des commissions où tous les acteurs concernés seraient présents dès le début des réflexions et pourraient s'approprier les conclusions des études scientifiques, techniques et les choix politiques et (2) de mettre au point un support technique de cette négociation permettant la présentation et l'analyse des différentes données.

Exemple du bulbul orphée à la Réunion

La problématique de gestion d'un oiseau introduit sur l'île de la Réunion a fait évoluer l'idée d'une commission multi-acteurs et nous a permis de tester son efficacité.

Le bulbul orphée, *Pycnonotus jocosus*, est un passereau sud asiatique qui a été introduit en 1972 sur l'île de la Réunion, comme dans beaucoup d'autres régions du globe. Très rapidement, cette espèce de volière a envahi l'ensemble de l'île et est passée du statut d'oiseau rare, chanteur et coloré, recherché par les habitants de l'île (fin des années soixante-dix), à celui d'envahisseur potentiel (fin des années quatre-vingt) puis à celui de ravageur des cultures dans les années quatre-vingt-dix. En 1995, aux premières plaintes de certains agriculteurs (notamment à cause de dégâts sur cultures de mandarine) s'ajoutent les préoccupations de certains biologistes quant à une éventuelle compétition du bulbul avec des oiseaux endémiques et à une éventuelle diffusion de pestes végétales introduites.

Fait rare pour un problème de gestion d'oiseau, ces évolutions de l'appréciation du bulbul ont conduit à un consensus entre acteurs de l'agriculture et de l'environnement et ont abouti à la mise en place d'un groupe de travail. Très rapidement, sa constitution s'est alors approchée de ce qui pouvait être attendu pour une prise de décision et une action optimales, c'est-à-dire où autorités territoriales, experts, populations affectées et organismes exécutifs étaient représentés. L'efficacité de ce groupe résidait aussi dans la complémentarité des compétences des différents acteurs et des niveaux d'organisation qu'ils représentaient. Nous avons ainsi identifié un niveau national, un niveau régional et un niveau local dont l'assemblage est présenté figure 1. Ainsi pour chaque type d'acteur, l'identification de plusieurs

niveaux de compétence permet de prendre en compte l'ensemble hiérarchique des responsabilités ou des connaissances.

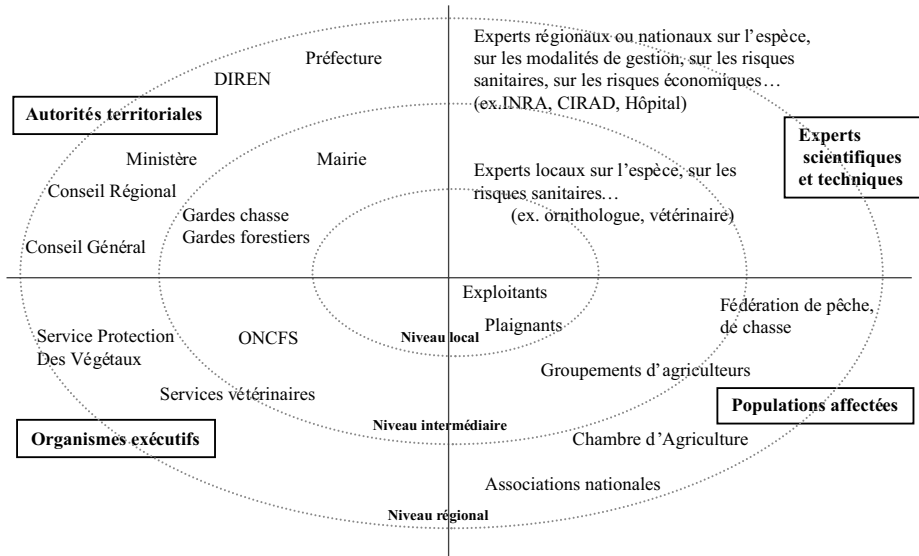


Figure 1. Organigramme des acteurs intervenant dans un problème de gestion de faune comme celui du bulbul orphée à la Réunion.

Ce type d'organigramme se retrouve plus largement dans de nombreux cas de gestion dès lors que l'ensemble des acteurs concernés sont intégrés au système.

Pour orienter les stratégies de gestion, le groupe multi-acteurs avait décidé de faire réaliser un travail de recherche sur les comportements alimentaires (régime alimentaire, typologie des dégâts aux productions fruitières, comportements de recherche) et les modalités de dispersion du bulbul (mouvements des oiseaux, habitats préférentiels...). Contrairement aux hypothèses initiales, les résultats obtenus au bout de trois années par marquage, radio-pistage, comptage, etc. (Mandon-Dalger, 2002) ont montré qu'il n'existait pas d'erratisme altitudinal marqué, c'est-à-dire de déplacements des oiseaux sur plusieurs kilomètres en fonction des ressources alimentaires (essentiellement fructification des agrumes). En revanche, d'autres résultats permettaient de poser d'autres hypothèses concernant la colonisation de l'île et l'usage des paysages par cet oiseau. Par exemple, les données d'occupation de l'espace et de déplacements des oiseaux soulignaient une forte utilisation des ravines arborées, bosquets et lisières qui traversent le paysage. Or c'est à proximité de ces structures que les dégâts semblent les plus forts (Mandon-Dalger, 2002). Les résultats mettent aussi en évidence la forte présence de cet oiseau dans un paysage contenant peu de ressources alimentaires : les champs de canne à sucre et qui semblent cependant être des sites privilégiés pour les dortoirs. Bien que des études complémentaires soient nécessaires pour valider la généralisation de ces hypothèses fonctionnelles, ces résultats permettaient d'inciter les gestionnaires à repenser leur

planification du territoire, en procédant par exemple à un examen du contexte géographique des parcelles lors de la création de nouveaux vergers. À terme, la prise en compte de ces facteurs par la profession et notre volonté de promouvoir un support spatial de communication et d'intégration imposerait un travail conjoint entre le géographe qui dispose de nouvelles bases de données d'usage du sol et de topologie sous Système d'information géographique (SIG), l'écologue qui peut fournir la variabilité des différents facteurs significatifs, et l'agronome qui connaît les itinéraires techniques et les phénologies des cultures.

Dans cet exemple, la proposition faite par les différentes disciplines et les différents organismes d'une gestion intégrée s'est organisée autour de la complémentarité des résultats et des actions qu'il était possible de mener aux divers niveaux d'organisation identifiés. Nous pouvons ainsi montrer qu'un emboîtement des prises de décisions rend cohérentes les actions menées à chaque niveau mais que l'ensemble constitue également une stratégie efficace. Par exemple, (1) au niveau régional, la redéfinition du statut de l'oiseau (travail mené par la DDAF²-SPV³) et une politique de communication et de réorientation de certains objectifs agricoles vont induire, (2) au niveau des communes, l'organisation d'une lutte obligatoire organisée par la FDGDEC⁴ sous contrôle de la DDAF-SPV ; (3) au niveau local, les actions de protection (filet, et limitation de la ressource « fruits sauvages introduits » dont se nourrit abondamment cet oiseau) ou de limitation des effectifs de bulbul dans les sites définis à risques forts seront d'autant plus efficaces qu'ils prendront en compte les niveaux supérieurs (Clergeau *et al.*, 2002).

Vers une ingénierie écologique

Ces deux exemples montrent comment une recherche cognitive peut s'articuler avec l'action. Le contexte de durabilité impose la co-construction de l'espace du problème et une réflexion collective sur l'orientation d'une partie des recherches scientifiques à développer. Dans le cadre d'espèces à risques pour l'agriculture, nous avons vu que les connaissances biologiques sont obligatoirement à mettre en situation d'une part avec le fonctionnement des populations animales au niveau des paysages et d'autre part avec les jugements et comportements humains. Mais ceci implique un outil d'intégration et de communication efficace, par exemple un support cartographique qui a l'avantage de la représentation, de l'information et de l'analyse mais qui peut aussi permettre la prévision, voire la prédiction. Les représentations spatiales, souvent utilisées dans la phase diagnostic du développement territorial, le sont beaucoup moins dans les processus de suivi-évaluation, ce qui handicape souvent l'appropriation des résultats par l'ensemble des acteurs (Maurel, 2001). C'est l'ensemble des champs disciplinaires et de leurs moyens d'intégration qui peut être à la base d'une nouvelle recherche en ingénierie écologique

2. Direction départementale de l'agriculture et de la forêt.

3. Service de la protection des végétaux.

4. Fédération départementale des groupements de défense contre les ennemis des cultures.

(voir aussi le numéro spécial sur l'ingénierie écologique de *NSS*) qui ne se cantonnerait plus au seul aspect technique de résolution de problèmes ponctuels mais qui serait capable de faire émerger une nouvelle recherche avec ses propres objets (interfaces disciplinaires, nouvelles échelles de travail, etc.). C'est dans cet esprit que nous avons orienté une recherche méthodologique permettant de formaliser un travail pluridisciplinaire qui s'appuie sur les démarches d'élaboration de cartes de risque.

VERS LA CONSTRUCTION D'UN SUPPORT D'AIDE À LA DÉCISION

Le concept de carte de risque

La construction de cartes de risque est classiquement utilisée pour évaluer et représenter des espaces soumis à des risques majeurs (inondation, avalanche, etc.) (Charodon et Thouret, 1994) mais aussi à des risques plus diffus comme les pollutions de l'eau (Launay, 1997). De manière générale, ces méthodes définissent et construisent le risque comme la confrontation spatio-temporelle d'un aléa et d'une vulnérabilité. La carte d'aléa représente les occurrences spatio-temporelles d'un dommage potentiel et la carte de vulnérabilité exprime la sensibilité du système à l'aléa en question.

En transposant ces méthodes à la gestion de populations animales considérées comme problématiques, la carte d'aléa correspond à la présence et aux activités de la population d'animaux sauvages potentiellement dommageable pour un système (agricole, urbain, etc.) repérées dans l'espace et le temps. Face à cet aléa, la carte de vulnérabilité correspond à la présence d'éléments (structuraux, fonctionnels, humains, etc.) potentiellement sensibles aux populations d'animaux sauvages ou à ses comportements. En synthèse, la carte de risque présente les interactions négatives potentielles entre ces populations d'animaux sauvages et le système concerné (Le Lay, Clergeau et Hubert-Moy, 2001).

Afin de mettre au point un protocole complet et de tester la faisabilité et l'efficacité de la démarche, nous avons choisi un système complexe : le système urbain. Sa complexité se situe à la fois dans son organisation spatiale, son fonctionnement et sa gestion multi-acteurs organisée, là encore, selon un emboîtement hiérarchique et spatial. Dans ce contexte, les problèmes émergeant en faune sauvage y sont de plus en plus importants et récurrents, et le couplage entre les différentes connaissances et les volontés politiques toujours difficiles. Ce système qui a déjà en sa possession des outils thématiques et informatiques, se prêtait bien à notre objectif, mais imposait aussi clairement de tenir compte d'une faisabilité d'appropriation du support par des services municipaux ; il fallait tenir compte des jeux de données accessibles, des types de logiciels, des modes de représentations déjà connus, etc.

Notre choix s'est orienté sur des villes dont nous disposions déjà de données suffisantes, à la fois pour des espèces animales et pour les images de structure urbaine. Nous avons notamment construit notre démarche sur les gestions de faune de la ville de Rennes.

Notre premier travail a consisté en la définition de la méthodologie générale de construction d'une carte de risque appliquée à une aide à la gestion de la faune sau-

vage. Ainsi nous avons défini que, dans une première étape, il convenait de formaliser une base commune de spatialisation qui permette d'asseoir les descriptions de structure du paysage, d'habitat de la faune et des activités et sensibilités humaines. C'est à partir de ces constructions que l'analyse pluridisciplinaire peut ensuite s'effectuer et déboucher sur un travail collectif de choix de gestion. Nous exposerons ici les principales étapes de la construction de cette cartographie du risque appliquées à la gestion d'oiseaux créant des nuisances à la ville de Rennes. Ces étapes sont réalisées au moyen d'un SIG (Système d'information géographique).

Une première étape de description de la structure urbaine

L'objectif est double : il s'agit non seulement de créer une base de données spatiales utilisables pour repérer la position de tous les éléments que nous souhaitons intégrer, ceux du système écologique et ceux du système anthropique, mais aussi de construire des variables reflétant le fonctionnement de ces systèmes.

En collaboration avec des géographes (laboratoire Costel de l'université de Rennes 2), nous avons mis au point un protocole de description de l'occupation du sol urbain (bâti, pelouse, arbre, eau, etc.) à partir de données cartographiques déjà définies par les services techniques de la ville (par ex. la couche thématique de tous les bâtiments de la ville) et de photographies aériennes analysées par classifications semi-automatiques (voir méthodologie *in* Le Lay et Clergeau, 2001). Cette description d'occupation du sol obtenue sur la ville entière, à la précision du mètre, permet ensuite d'obtenir différentes variables utilisables pour typer l'organisation de l'espace (fréquences de classes d'occupation du sol, indice d'hétérogénéité du paysage, etc.) ou l'environnement d'un point (distance à l'eau, à une ressource alimentaire, etc.).

Mise en relation entre écologie animale et caractéristiques de l'espace urbain

Les caractéristiques de l'espace urbain global obtenues lors de la première étape peuvent être comparées avec celles de l'espace réellement utilisé par une espèce animale. Les différences permettent de définir les spécificités (l'ensemble des caractéristiques de l'espace) d'une niche écologique de la population animale étudiée. L'objectif est de hiérarchiser ces variables environnementales, afin de permettre par généralisation de définir l'habitat potentiel de la population animale sur l'espace urbain global.

Dans un premier temps, nous avons réalisé un couplage espace-espèce en prenant en compte les variables principales « à dire d'expert » liées au fonctionnement d'une espèce. L'analyse a été du type multicritère, c'est-à-dire fondée sur une hiérarchisation des facteurs conditionnant un choix de pondération des données (voir Le Lay, 2002). Ce travail mené sur les situations des dortoirs d'étourneaux dans la ville de Rennes a permis de définir des secteurs où le regroupement nocturne de ces oiseaux est plus attendu que d'autres (voir résultats *in* Le Lay et Clergeau, 2001).

Cependant pour certaines espèces et particulièrement en ville, les connaissances d'expertise sont insuffisantes pour mener à bien ces modèles « *a priori* ». Nous avons

donc testé l'utilisation d'une analyse multifactorielle des variables environnementales implémentées dans un logiciel autonome, Biomapper (Hirzel *et al.*, 2002) qui met en jeu un ensemble complet de variables. Nous proposons de les regrouper sous quatre thématiques principales :

- les caractéristiques abiotiques (topographie, pluviométrie, vent, etc.) ;
- les types d'usage du sol (comme ceux définis dans la première étape) et leur organisation (indice de fragmentation, d'hétérogénéité, etc.) ;
- l'existence de ressources utilisables par l'espèce et leur localisation (distance aux abris, ressources alimentaires ponctuelles, etc.) ;
- la présence d'autres espèces qui peuvent réagir et leur localisation (prédateurs, compétiteurs, etc.).

L'exercice a été notamment réalisé dans le cas du goéland argenté *Larus argentatus* qui a commencé à nicher en centre ville de Rennes en 1987, causant progressivement de plus en plus de nuisances sonores. À partir d'un ensemble important de variables incluant notamment les caractéristiques des toits où pouvait nicher cet oiseau et les localisations des ressources alimentaires (marchés, poissonneries, décharges, etc.), la modélisation a permis de montrer l'évolution des sites potentiels de reproduction du goéland sur Rennes. La cartographie des effets des interventions humaines sur les nids et des nouveaux quartiers qui pourraient être adoptés par l'oiseau devient un support de décision pour les services de la ville de Rennes en charge de limiter les impacts du goéland (voir résultat *in* Le Lay, 2002).

110

Modélisation de la vulnérabilité du système anthropique

D'une manière générale, nous pouvons définir quatre types de vulnérabilité face à la présence d'une faune sauvage non souhaitée (Le Lay, Clergeau et Hubert-Moy, 2001) :

- la vulnérabilité sanitaire (dommages épidémiologiques ou corporels subis par les citadins ou leurs animaux domestiques) ;
- la vulnérabilité sociale (atteinte à la qualité du cadre de vie, perturbations psychologiques s'exprimant par ex. par les plaintes) ;
- la vulnérabilité économique (coût de nettoyage ou d'intervention, réparation de dégâts, etc.) ;
- la vulnérabilité écologique (atteintes potentielles à des espèces patrimoniales, etc.).

Ces facteurs font intervenir un ensemble de disciplines différentes qui vont pouvoir fournir leurs propres jeux de données. Dans le cas des dortoirs d'étourneaux, nous avons ainsi collaboré avec le laboratoire de Parasitologie médicale du centre hospitalier de Rennes (recherche de parasites et germes portés par l'oiseau, identification des sites à risques), et le laboratoire de Recherche en sciences sociales de l'université Rennes 2 (enquête dans la ville, étude des plaintes). Nous avons alors pu construire différentes cartes de vulnérabilité (*figure 2*). Celles-ci sont intégrées dans une carte de vulnérabilité globale qui combine les différentes informations. Cette modélisation est conduite sous analyse multicritère, la hiérarchisation et les pondé-

ratings des différentes vulnérabilités étant à conduire sous négociation collective par le gestionnaire-décideur (Le Lay, 2002).

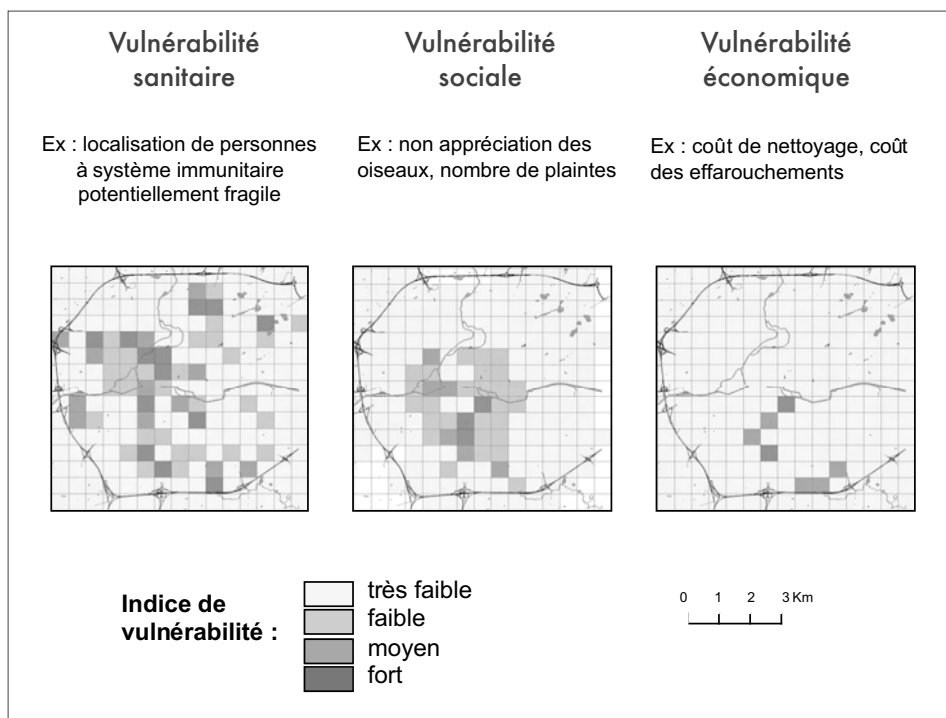


Figure 2. Exemples de cartes de vulnérabilité obtenues sur la ville de Rennes face à un problème de dortoirs d'étourneaux.

Les indices de vulnérabilité sont établis dans chaque maille par sommation de données quantitatives hiérarchisées et pondérées. Ces trois types de vulnérabilités sont ensuite eux-même hiérarchisés pour les réunir en une seule carte de vulnérabilité globale.

Dernière étape de construction d'une carte de risque et choix de gestion

La production des différents modèles thématiques tels que nous venons de les présenter fournit la base aux deux cartes, carte d'aléas, correspondant souvent aux cartes d'habitat potentiel, et carte de vulnérabilité, qui devront à leur tour être intégrées dans une seule carte, la carte de risque. Cette dernière construction est, comme pour la vulnérabilité, l'objet de la négociation collective et c'est l'approche d'un consensus pluridisciplinaire qui doit être recherché dans le choix des pondérations à appliquer à chaque carte (*figure 3*).

Le support d'aide à la décision peut être alors constitué de plusieurs cartes de risques, légèrement différentes selon les pondérations appliquées à la carte d'habitat potentiel et aux vulnérabilités. Les différents scénarii permettent par exemple d'évaluer les zones à plus haut risques, sensibilité forte et/ou habitat potentiel élevé, pour orienter une veille, voire justifier une intervention immédiate. Dans la plupart des

cas, ce type de support cartographique permettra de construire une politique de gestion à plus long terme.

Nous avons pu présenter aux services municipaux de Rennes concernés par la gestion des goélands dans la ville, la carte d'habitat potentiel de l'espèce. Même si l'intégration des différents résultats disciplinaires n'a pas encore été l'objet d'une appropriation et d'une réunion de prise décision, la ville a souligné immédiatement l'intérêt de la carte comme support de discussion. Face à la présentation de cette première carte, les prochains immeubles sur lesquels les goélands pourraient nicher ont été repérés et vont être plus particulièrement contrôlés...

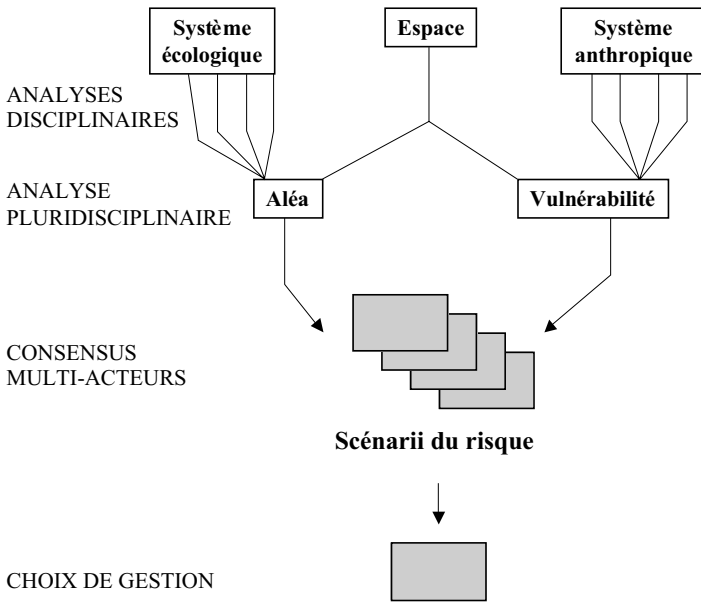


Figure 3. Schéma de construction d'une cartographie du risque impliquant une pluridisciplinarité.

CONCLUSION

Notre expérience de pluridisciplinarité, puis de tentative d'intégration interdisciplinaire, a été largement favorisée par l'objectif commun de travailler sur un même système (en l'occurrence le système urbain et périurbain) et de contribuer à la construction d'une aide à la prise de décision.

Les collègues des autres disciplines ont accompagné l'ensemble du projet depuis les définitions des enjeux, les variables à considérer, jusqu'à la participation active aux commissions organisées par la ville de Rennes pour gérer les problèmes induits par la faune sauvage. Ce travail commun qui, même avant la construction de la

carte de risque, a souvent été de l'interdisciplinarité (mise au point sur le sens des termes utilisés par le groupe), a permis de faire évoluer le cadre de certaines de nos recherches écologiques (importance par exemple des mouvements d'animaux au sein des paysages) mais a aussi clairement induit un nouvel espace de réflexion propre à une ingénierie écologique. Par exemple nous avons pu estimer l'importance des unités de lieu et de temps pour travailler sur différents objets d'un même système (voir Sauvage et Clergeau, 2005).

La construction de la carte de risque finale, à travers une réelle discussion pluridisciplinaire permettant le choix des pondérations (pour l'instant il s'agit de simulation ou de discussion partielle), sera une étape importante pour tester l'émergence de l'interdisciplinarité, pour un développement d'autre type de modélisation et pour la validation du type de support que nous tentons de proposer.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CHARDON A. C. & THOURET J. C., 1994, Cartographie de la vulnérabilité d'une population citadine face aux risques naturels : le cas de Manizales, *Mappemonde*, 4, p. 37-40.
- CLERGEAU P., 1990, Réflexions sur le problème « étourneau » et sur le choix des moyens de lutte, *La Défense des végétaux*, 263, p. 1-7.
- CLERGEAU P., 1995, Importance of multiple scale analysis for understanding distribution and for management of an agricultural bird pest, *Landscape and Urban Planning*, 31, p. 281-289.
- CLERGEAU P. (dir.), 1997, *Oiseaux à risques en ville et en campagne; vers une gestion intégrée des populations*, INRA éd., coll. « Un point sur », 374 p.
- CLERGEAU P., MANDON-DALGER I. & GEORGER S., 2002, Mise en place d'une gestion intégrée d'un oiseau ravageur des cultures à la Réunion, *Ingénieries*, 30, p. 71-80.
- HIRZEL A. H., HAUSSER J, CHESSEL D. & PERRIN N., 2002, Ecological-Niche Factor Analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data? *Ecology*, 83, p. 135-142.
- LAUNAY M., 1997, *La pollution agricole diffuse par l'azote sur le bassin versant de l'Elorn : diagnostic du risque par agrégation de données à différentes échelles*, thèse de doctorat d'université, Rennes.
- LE LAY G. & CLERGEAU P., 2001, Une démarche cartographique pour la gestion de la faune sauvage à l'échelle du paysage, *Revue Internationale de Géomatique*, 11, p. 423-442.
- LE LAY G., 2002, *Modélisation des interactions entre système anthropique et faune sauvage : la carte de risque appliquée à la gestion de la faune en milieu urbain*, thèse de doctorat d'université, Rennes.
- LE LAY G., CLERGEAU P. & HUBERT-MOY L., 2001, Computerised map of risk to manage wildlife species in urban areas, *Environmental Management*, 27, p. 451-461.
- MANDON-DALGER I., 2002, *Sélection de l'habitat et dynamique d'invasion d'un oiseau introduit, le cas du Bulbul orphée à La Réunion*, thèse de doctorat d'université, Rennes.
- MAUREL P. & LARDON S., 2001, Des représentations spatiales pour interagir sur les dynamiques territoriales, *Géomatique et espace rural*, Journées Cassini 2001, Montpellier.
- SAUVAGE A. & CLERGEAU P., 2005, Pratiquer l'interdisciplinarité pour gérer l'animal en ville, in N. Mathieu et Y. Guermont (dir.) *La ville durable, du politique au scientifique*, Paris, coédition Cemagref, Cirad, Ifremer et Inra, coll. NSS « Indisciplines ».

Chapitre 10

Interdisciplinarité et biodiversité : un grand défi*

115

Est bien révolue l'époque où le « savant » pouvait embrasser tout le savoir scientifique de son époque ! Les disciplines scientifiques n'ont cessé de se spécialiser pour évoluer aujourd'hui indépendamment les unes des autres. La source principale de cette spécialisation est la diversification des outils. Dans l'étude de la biodiversité (à laquelle on s'intéressera particulièrement ici, mais l'analyse pourrait évidemment s'appliquer à bien d'autres disciplines), combien sont par exemple différents les approches et les équipements des écotoxicologues de celles des communautés qui étudient la génétique des populations de rongeurs ! Pourtant, sans remettre en cause l'intérêt de poursuivre la spécialisation et la diversification des disciplines, chacun perçoit que l'interdisciplinarité est une prodigieuse source de connaissances. Qui plus est, la réponse à certaines grandes questions scientifiques qui préoccupent prioritairement notre société ne pourra venir que d'approches interdisciplinaires.

En particulier, avec l'évidence qu'il ne peut y avoir de développement durable sans la préservation de la biodiversité, anticiper sa réduction pour mieux l'enrayer devient un enjeu majeur. Or, pour prédire l'impact des changements environnementaux résultant des activités humaines, qu'elles en soient la conséquence directe (dégradation des ressources naturelles, surexploitation des ressources marines...) ou indirecte (changements climatiques...), il est bien sûr indispensable de connaître au préalable les limites des capacités d'adaptation des organismes vivants à ces changements. Tous les niveaux d'échelle doivent être abordés, c'est-à-dire aussi bien de la dynamique des populations que de la biologie de l'individu, de son comportement aux bases moléculaires des processus adaptatifs et cela dans le cadre d'une approche évolutive. Les outils nécessaires vont des biomathématiques aux instruments de mesure ou d'émetteurs faisant appel aux dernières avancées en microélectronique ou encore aux outils de la biologie cellulaire et moléculaire, à l'utilisation d'isotopes stables, à la chimie analytique ou à la physique. Par exemple, depuis que l'on sait que les végétaux peuvent émettre des molécules volatiles susceptibles d'attirer les prédateurs de leurs ravageurs, la chimie est appelée à jouer un rôle clé pour comprendre comment évolue la variété des espèces chez les insectes en fonction de la diversité des végétaux. L'étude *in situ* de la faune des fosses abyssales implique le

* Chapitre rédigé par Yvon LE MAHO

développement d'une ingénierie adaptée. Les masses de données à analyser sont de plus en plus considérables. Ainsi, un animal marin équipé d'un système d'acquisition de données miniaturisé peut rapporter des informations qui ont été échantillonnées chaque seconde pendant une année, ce qui nécessite le développement de programmes informatiques qui assurent un prétraitement des données lors de leur acquisition et optimisent leur analyse après récupération.

Après l'ère de la quête aux gènes, la recherche de leurs fonctions est devenue la nouvelle voie royale de la biologie moléculaire sous le nom de physiologie intégrative. Néanmoins, comment déterminer, par exemple, par quels mécanismes les organismes vivants font face aux contraintes environnementales si la physiologie intégrative se limite à cette voie qui part de la pêche aux gènes ? L'objet de la physiologie est avant tout de comprendre comment l'organisme, qu'il soit bactérien, animal ou végétal, fonctionne et, par conséquent, parallèlement à l'approche qui part des gènes pour étudier leur fonction, il est essentiel de développer l'approche inverse dont le point de départ est l'étude des fonctions (Le Maho, 2002). L'écologie de demain sera donc une science du fonctionnement. L'essor de cette écologie fonctionnelle, outre le fait qu'il est la réponse appropriée à la nécessité de déterminer les limites de la capacité d'adaptation des organismes vivants aux changements, est qu'il ouvre de nombreuses perspectives permettant d'accroître les services que nous rend la biodiversité, notamment dans les domaines biomédical et agroalimentaire et celui des biotechnologies.

En effet, chaque espèce étant une innovation qui a remarquablement réussi, l'homme a pour l'instant surtout tiré parti des substances naturelles produites par les végétaux, puisque la moitié des médicaments en sont issus. Mais, les mécanismes adaptatifs par lesquels les animaux font face à la diversité des niches écologiques de notre planète, souvent dans des conditions qui nous apparaissent extrêmes et sont impossibles à mimer au laboratoire, constituent une source d'informations encore insuffisamment valorisée. Ainsi, l'intérêt du peptide que nous avons identifié dans l'estomac du manchot royal, en association avec la conservation de poisson pendant deux à trois semaines à une température de 37°C, n'est pas seulement lié au fait que cette nourriture permet de nourrir le poussin à l'éclosion si le conjoint parti en mer n'est pas revenu à temps (Gauthier-Clerc *et al.*, 2000). Ce peptide, la sphéniscine, s'est en effet révélé avoir de remarquables propriétés antimicrobiennes et antifongiques. Ainsi, *in vitro*, il induit la suppression des spores d'*Aspergillus fumigatus* à l'origine de l'aspergillose (Thouzeau *et al.*, 2003). Dans la mesure où la sphéniscine s'avérerait pouvoir être utilisée sans induire de problèmes de résistances dans cette pathologie qui fait partie des maladies nosocomiales, elle pourrait donc éventuellement ouvrir des perspectives biomédicales.

Un autre exemple est celui des recherches sur le mécanisme de navigation en vol de la mouche (Franceschini, 1999). Les insectes ailés ont en effet des capacités sensorimotrices exceptionnelles, telles celles qui rendent possibles les acrobaties d'une libellule pourchassant un moustique. Et les millions d'espèces d'insectes que nous a livrées l'évolution constituent une gigantesque base de données pour l'essentiel inexploitée. En fait, c'est sa vision du mouvement, depuis l'optique jusqu'au traite-

ment des signaux, qui permet à la mouche de se stabiliser et de se guider en vol. Sur les bases de cette fonction physiologique, N. Franceschini et ses collaborateurs ont transcrit en électronique le principe d'un neurone détecteur de mouvement pour donner la vue à un « robot-mouche » capable d'éviter les obstacles. Ce principe sera peut être un jour utilisé en aéronautique. Mais le fonctionnement de ce robot permet aussi de découvrir des questions dont on n'aurait pas eu nécessairement l'idée auparavant en neurobiologie. Le retour vers la physiologie est alors d'autant plus fructueux que l'on s'est efforcé de mimer les réseaux neuronaux naturels grâce à l'électronique. Ces recherches font donc appel à de nombreuses disciplines qui n'ont généralement pas l'occasion de cohabiter : la neurobiologie, l'intelligence artificielle, la mécanique, l'optique, l'électronique, l'informatique, l'automatique, la robotique et l'entomologie...

Cependant, de tels exemples font encore exception et, alors que les communautés de chercheurs spécialisés ne cessent de grandir, le développement de l'interdisciplinarité s'est jusqu'à présent essentiellement limité à de grandes formules incantatoires par les directions des organismes de recherche. Il est donc intéressant de chercher à comprendre pourquoi la situation reste en grande partie bloquée.

LES OBSTACLES AU DÉVELOPPEMENT DE L'INTERDISCIPLINARITÉ

Ils sont d'abord institutionnels. Le ministère délégué à l'Enseignement supérieur et à la Recherche devrait être le lieu même où la stratégie de recherche se définit. On y trouve évidemment des personnalités scientifiques éminentes et dévouées. Mais ce ministère est aussi un lieu où il convient d'être aux postes clés afin de défendre sa discipline et éventuellement les intérêts de son propre laboratoire, notamment pour ce qui concerne la distribution des moyens financiers universitaires ainsi que l'attribution des postes universitaires et des bourses de thèses ministérielles. Avant même de parler de pluridisciplinarité, il en résulte que les disciplines non représentées aux postes clés ont peu de chances de voir leur situation prise en compte. C'est notamment le cas pour les disciplines sinistrées puisqu'elles ne sont alors évidemment pas en mesure de faire parvenir l'un des leurs à un poste clé du ministère.

Les approches biologiques dans les sciences de l'environnement sont particulièrement mal représentées au niveau des fonctions décisionnelles dans l'attribution des moyens. En effet, les sciences de l'environnement étant placées sous la tutelle des sciences de l'univers au ministère de la Recherche, il n'est pas surprenant que la vision de l'environnement y soit très physico-chimique. Dans cette vision, comme le dit si bien Jean-Louis Etienne, le « vivant » constitue au mieux la « justification » ou le « décor ». L'autre grand département qui devrait être concerné par le vivant, celui des sciences de la vie, est essentiellement tourné vers les sciences biomédicales. Le troisième département concerné par la biodiversité est celui de l'agronomie et de l'agroalimentaire, c'est en fait le seul qui s'y intéresse vraiment et qui a une action positive. Ceci est symptomatique de la difficulté de la prise en compte fonctionnelle de la biodiversité par le ministère de la Recherche malgré l'affirmation du caractère prioritaire de ce domaine. Comment dans un tel système, quelques mois seulement après la grande conférence « Biodiversité et gouvernance », la France pourrait-elle

donc jouer le rôle leader au plan international qui a été annoncé dans les recherches sur la biodiversité ! Alors que certains représentants du ministère sont juges et parties, il faudrait en effet qu'ils réduisent l'effort sur leur propre discipline pour donner une priorité aux recherches sur la biodiversité, un domaine pour lequel ils n'ont en outre aucune compétence suite aux cursus de formation trop monodisciplinaires mis en place depuis la fin des années soixante. Il ne faut pas, par exemple, chercher d'autres explications aux moyens dérisoires accordés par le ministère de la Recherche aux exceptionnelles collections du Muséum national d'histoire naturelle et cela malgré les priorités réitérées affichées par l'organisme.

S'il existe depuis peu des fonctions transversales au ministère de la Recherche, celles-ci ne sont pas décisionnelles pour ce qui concerne l'attribution des moyens financiers et humains aux laboratoires. Autant dire qu'elles ne peuvent contribuer à développer l'interdisciplinarité. En fait, tout en affichant comme prioritaire le développement de l'interdisciplinarité dans leurs stratégies de recherche, les communautés scientifiques continuent à évoluer très indépendamment les unes des autres dans tout le système d'organisation de la recherche scientifique. On retrouve ainsi cette priorité dans les programmes élaborés par l'ICSU (l'Union internationale des comités scientifiques), la hiérarchie des questions dépendant essentiellement de la puissance relative des différentes disciplines. Mais c'est essentiellement une « interdisciplinarité utilitaire », celle de disciplines qui ont besoin des autres pour répondre à leur questionnement. Ainsi, les climatologues cherchent à recruter des experts des sciences de l'homme et de la société pour répondre à leurs questions sur l'analyse des risques environnementaux. Cette démarche peut être nécessaire. À moins d'instrumenter les collègues des autres disciplines, elle ne doit cependant constituer qu'une étape vers l'approche réellement interdisciplinaire, c'est-à-dire celle où des chercheurs de différentes disciplines confrontent leurs différentes visions pour élaborer ensemble un nouveau questionnement et y répondre.

Le cloisonnement disciplinaire actuel a encore trop tendance à enfermer l'étude de la biodiversité dans les sciences de la vie où elle est marginalisée par le puissant *lobby* biomédical qui n'en voit que très rarement l'intérêt pour son propre domaine. En effet, l'attraction des sciences biomédicales, notamment en terme de moyens de recherche, est tellement forte pour les communautés scientifiques qui utilisent les outils de la biologie cellulaire et moléculaire qu'elles les ont jusqu'à présent généralement détournées des problématiques de recherche sur la biodiversité. On ne peut pas, par exemple, expliquer autrement que la communauté scientifique qui a élaboré le récent rapport de l'Académie des sciences sur la biologie cellulaire de demain ait pris le parti initial de ne pas considérer la biodiversité. Dans ce contexte, il n'est donc pas surprenant que, faute d'intérêt de la part des autres disciplines, la Stratégie nationale sur la biodiversité ait été définie par la seule communauté française d'écologie et il en est d'ailleurs de même dans tous les pays. Comme les équipes d'écologie ont surtout développé une approche populationnelle faisant essentiellement appel aux outils biomathématiques et à l'écologie comportementale, c'est donc ces voies qui sont privilégiées. Or, comme on l'a vu, ces voies ne peuvent à elles seules permettre de faire face aux grands enjeux sur la biodiversité. L'enjeu pour la straté-

gie de recherche sur la biodiversité est donc que les différentes communautés scientifiques confrontent leurs points de vue pour élaborer ensemble les questions prioritaires et y répondre. Une question clé est donc de savoir comment procéder pour amener l'ensemble des communautés scientifiques à s'intéresser à la biodiversité et à travailler ensemble sur de mêmes questions.

COMMENT DÉVELOPPER L'INTERDISCIPLINARITÉ ?

Le lieu où la recherche se déroule étant évidemment par définition le laboratoire, il s'agit donc de déterminer quelle structuration des Unités de recherche pourrait résoudre les problèmes actuels. Puisque, comme on l'a vu, la scission reste très marquée entre les différentes communautés, il est rare qu'une simple collaboration entre équipes aboutisse à une solide approche interdisciplinaire et le constat est le même pour les fédérations de laboratoire.

Il ne suffit pas non plus de mettre ensemble quelques chercheurs issus de disciplines diverses. Ils risquent en effet de perdre les liens avec leur discipline. Or, le développement d'une recherche interdisciplinaire au meilleur niveau suppose que les chercheurs restent au meilleur niveau dans leurs disciplines respectives, ce qui est difficile sans la conservation d'un fort ancrage disciplinaire. En outre, une forte interdisciplinarité au sein d'une même unité de recherche impose une multiplication des ressources humaines en ingénieurs et techniciens ainsi que des équipements, alors même que le niveau des moyens généraux attribués ne diffère pas entre les laboratoires mono et pluridisciplinaires. Qui plus est, pour ce qui concerne la biodiversité, elle reste encore le parent pauvre du point de vue du soutien qu'elle reçoit des organismes institutionnels et des universités. Il faut donc continuer à réparer cette injustice qui est aussi une grave erreur stratégique. L'identification prioritaire de ce domaine par de nombreux organismes tels le CNRS et l'Inra devrait aller dans le bon sens dès lors que seront surmontées les tentations de protectionnisme disciplinaire des responsables. Le CNRS vient de créer un département transversal et donc interdisciplinaire « Environnement et développement durable » (EDD). La biodiversité, un des piliers du développement durable, devrait y être rattachée avec une stratégie fortement interdisciplinaire et des moyens accrus.

La meilleure solution quant à la structure des laboratoires est à mes yeux la fusion de laboratoires, comme, par exemple, la mise en place de laboratoires communs pluridisciplinaires au CNRS. De telles communautés scientifiques présentent en effet l'avantage de responsabiliser les partenaires qui savent qu'ils seront irrémédiablement jugés sur les objectifs atteints en commun. La proportion des chercheurs issus des laboratoires d'origine impliqués dans les interfaces peut éventuellement être cependant réduite. Ce qui compte, en fait, c'est que ces chercheurs atteignent des objectifs scientifiques qu'il ne serait pas possible d'atteindre autrement.

La formation de laboratoires communs pluridisciplinaires présente le grand avantage de mettre en commun des moyens humains et des moyens en équipement et en fonctionnement auxquels aucun partenaire ne pourrait accéder isolément. Ainsi, nous n'aurions en effet jamais réussi à identifier le peptide antimicrobien sus-

ceptible d'expliquer au moins en partie cette conservation (Thouzeau *et al.*, 2003) sans l'expertise de Philippe Bulet et Laurence Sabatier, spécialistes de ces molécules dans le laboratoire de Jules Hoffmann. Qui plus est, une telle identification requiert des moyens en équipement très lourds, notamment en spectrométrie de masse et, sans la plate-forme de protéomique d'Alain Van Dorssaeller, l'étude aurait également été impossible. Or, développer une plate-forme de ce type suppose des moyens financiers considérables que seule peut apporter une collaboration avec des industriels et la communauté biomédicale. Cette collaboration doit évidemment continuer à se développer pour que la plate-forme reste parmi les plus performantes au plan international, ce qui est *a priori* inaccessible pour un laboratoire d'écologie. Inversement, nous avons apporté aux chimistes analytiques l'expertise de la physiologie de l'organisme et des recherches de terrain, élargissant ainsi leur approche à l'étude de molécules naturelles mises en jeu dans les mécanismes adaptatifs des animaux aux contraintes environnementales. Mais cette étude, qui s'était « glissée » à ma demande dans la charge de travail de nos collègues immunologistes et chimistes, n'a abouti que parce que j'avais obtenu du comité « Ars Cuttoli » de la Fondation de France un financement postdoctoral pour l'une des étudiantes du laboratoire, Cécile Thouzeau. Sans un tel financement et un engagement total de C. Thouzeau pendant trois ans, l'étude n'aurait jamais abouti. De telles circonstances ont peu de chances de se renouveler dans le système français et le développement de nos recherches à l'interface écophysiologie/protéomique implique par conséquent de franchir la nouvelle étape que constitue l'élaboration d'objectifs communs avec nos collègues chimistes et d'y affecter les ressources humaines nécessaires. C'est évidemment plus facile dans une structure commune.

Outre le fait que les équipements du laboratoire commun peuvent bénéficier à un plus grand nombre de chercheurs, les ressources humaines peuvent être plus facilement mobilisées dans l'intérêt général. Une telle structure commune n'a cependant aucune chance de se pérenniser s'il s'avère que le soutien aux interfaces dans la nouvelle entité se fait au détriment des moyens préalablement affectés aux activités disciplinaires, ce qui entraînera inévitablement des conflits d'intérêts entre les partenaires d'origine. Si les moyens en équipement et fonctionnement sont progressivement assurés par l'Agence nationale de la recherche (ANR), cela signifie que l'agence devra veiller à ce que l'expertise de ces différents comités ne se fasse pas au détriment de la recherche interdisciplinaire. Pourquoi, par conséquent, une priorité de l'ANR ne serait pas le développement de l'interdisciplinarité ? Par ailleurs, du point de vue des ressources humaines en techniciens et ingénieurs, des recrutements supplémentaires devront être assurés par les organismes de recherche pour les interfaces. En effet, la structure commune n'aura aucune chance de perdurer si, par exemple, les postes d'ingénieurs et de techniciens affectés aux interfaces sont prélevés sur le même quota dont disposait chaque laboratoire à l'origine. Cela signifie que les deux départements transdisciplinaires du CNRS devront pouvoir attribuer des moyens en personnel aux équipes interdisciplinaires, ce qui implique évidem-

ment un partage de moyens de la part des départements disciplinaires et une intervention de la gouvernance générale en ce sens.

En conclusion, un réel développement des recherches interdisciplinaires sur la biodiversité est possible en France, mais il nécessite un important changement des mentalités de bon nombre de responsables, des structures et des modes de fonctionnement de la recherche, aussi bien pour le ministère de tutelle que les départements des organismes de recherche et les unités de recherche. Des moyens adéquats en soutien financier et en ressources humaines sont évidemment également indispensables de la part des organismes de recherche et de l'ANR. Les obstacles au développement des interfaces dans les domaines autres que la biodiversité étant les mêmes, il n'y a pas de raison de penser que les remèdes puissent être différents.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- FRANCESCHINI N., 1999, De la mouche au robot : reconstruire pour mieux comprendre, in Bloch V. (dir.), *Cerveau et Machines*, Paris, Hermès, p. 247-270.
- GAUTHIER-CLERC M., LE MAHO Y., CLERQUIN Y., DRAULT S. & HANDRICH Y., 2000, Penguin fathers preserve food for their chicks, *Nature*, 408, p. 928-929.
- LE MAHO Y., 2002, Nature and function, *Nature*, 416, p. 21.
- THOUZEAU C., LE MAHO Y., FROGET G., SABATIER L., LE BOHEC C., HOFFMANN J. & BULET P., 2003, Spheniscins: Avian β -defensins in preserved stomach content of king penguin, *Aptenodytes patagonicus*, *J. Biol. Chem.*, 278, p. 51053-51058.

Chapitre 11

Sur le bon et le mauvais usage des mathématiques et statistiques dans les sciences de l'environnement*

123

INTRODUCTION

C'est sans doute faire preuve d'une certaine arrogance que de se faire juge de ce qui est bonne et mauvaise pratique. Dans 50 ou 100 ans, certains se demanderont sûrement pourquoi nous avons fait preuve d'un tel enthousiasme pour des idées qui, rétrospectivement, seront apparues comme des impasses. Une partie des outils ou des concepts que nous utilisons par exemple dans le domaine scientifique sont plus un héritage – une tradition – héritée de nos prédécesseurs qu'un choix logique parmi un ensemble d'approches possibles. Thomas Kuhn (1962) avait mis l'accent sur cet aspect social de la pratique scientifique – mon objectif bien plus modeste est de voir dans quelle mesure quelques approches et concepts utilisés dans les sciences de l'environnement relèvent d'un héritage de pratiques passées, si nous devons remettre en cause ces pratiques, et par quoi les remplacer ou les compléter.

Un des phénomènes marquants de ces dernières années est l'augmentation considérable de la quantité d'information à notre disposition : cela est dû en partie à la croissance du nombre de chercheurs et donc des études de terrain ou théoriques mises en œuvre¹, mais aussi bien sûr à l'émergence d'outils, tels les satellites, capables de nous submerger sous des quantités considérables de données². Il est devenu de plus en plus difficile de maîtriser la littérature sur un sujet, si spécialisé soit-il, et je connais peu de collègues qui trouvent le temps de lire en détail ce qui est publié, de vérifier les sources et comment les données sont acquises, analysées et interprétées. L'information la plus disponible et celle largement utilisée – comme celle provenant par exemple des résumés – est alors d'une qualité des plus variables, et fait que différentes parties peuvent aboutir à des conclusions opposées en « choisissant » plus ou moins consciemment ce qui supporte leur point de vue.

Deux ouvrages récents illustrent cet aspect : le premier, par Bjørn Lomborg (Lomborg, 2001), statisticien, est une critique détaillée du mouvement environnementaliste, et se fonde sur les statistiques officielles disponibles pour montrer qu'un

* Chapitre rédigé par Nigel G. YOCCOZ

1. Olkin (1995) cite une estimation de 40 000 journaux scientifiques, contenant 1 million d'articles par an.

2. L'exploration de très grands jeux de données – parfois plusieurs millions d'individus et plusieurs centaines de variables – pose des problèmes spécifiques, regroupés sous le terme de *data mining* (Hand *et al.*, 2000).

grand nombre d'indicateurs de notre environnement auraient une tendance positive. Cet ouvrage a fait l'objet de revues enthousiastes ou critiques suivant l'origine des lecteurs. Le deuxième, par Joel Best (Best, 2001), reprenant la citation fameuse de Disraeli « il y a les mensonges, les sacrés mensonges et les statistiques » s'adresse plus spécifiquement aux abus relevés dans les sciences sociales. Dans les deux cas, il s'agit à la fois de problèmes associés à un certain anuméricisme ou analphabétisme numérique (*innumeracy* en anglais, voir *illiteracy*), et à une utilisation biaisée de l'information disponible. Les sous-titres de ces deux livres, *Measuring the real state of the world*, et *Untangling numbers from the media, politicians and activists*, indiquent bien, je crois, l'importance prise par l'interprétation des données disponibles, interprétation qui dépend à la fois de méthodes d'analyses et d'un cadre théorique.

124

Face à cette explosion de l'information et les problèmes d'analyse et de synthèse qui en découlent, les méthodes que nous enseignons, ou utilisons dans nos articles, sont souvent bien pauvres, dans le sens où elles sont par trop simplificatrices, et ne permettent pas de prendre en compte cette diversité des idées et des données, tant du côté empirique que du côté théorique. Si nous voulons progresser, je crois nécessaire une réévaluation de la présentation et de l'utilisation des modèles statistiques et mathématiques dans les sciences de l'environnement.

Tout au long de ce chapitre, je prendrai comme exemple le suivi de la biodiversité (Yoccoz *et al.*, 2001), où suivi est pris dans le sens de ce que les anglo-saxons appellent *monitoring*.

UNE REVUE CRITIQUE D'UNE CERTAINE PRATIQUE DES STATISTIQUES

Mon argument tient en quelques mots : l'emploi abusif des tests d'hypothèses, associé, pour reprendre les mots de John Nelder, au « culte de l'étude isolée », (Nelder, 1986) a conduit à oublier que les statistiques sont d'abord un ensemble de méthodes et de concepts qui ont pour objectifs d'extraire de la connaissance. L'information, nous en avons souvent trop, et elle demande à être structurée et restituée sous une forme adéquate³. En particulier, l'incertitude, allant de pair avec la présentation d'un résultat, doit être rendue apparente et quantifiée, mais ceci n'est qu'un des apports des statistiques.

Les outils des statistiques sont très divers, et vont de la planification des études observationnelles et expérimentales à l'analyse et à la synthèse des données. À l'opposé, un test – le plus souvent réduit à des étoiles ou un niveau de signification – ne représente qu'une mesure de l'évidence contre une hypothèse nulle dont, dans la grande majorité des cas, nous savons qu'elle est *a priori* fautive (Anderson *et al.*, 2000). Un test ne nous renseigne pas sur l'importance quantitative des facteurs et de leurs interactions, un test ne mesure pas l'évidence en faveur d'une hypothèse, et ne permet pas de comparer des hypothèses qui ne sont pas hiérarchisées.

3. Je distingue ici information et connaissance, sous-entendant qu'un ensemble d'informations ou de données ne constitue un apport à nos connaissances que lorsque ces informations sont intégrées et structurées par rapport aux connaissances « acquises », quitte bien sûr à les remettre en cause.

Cette critique n'est pas nouvelle : de nombreux statisticiens et autres scientifiques de différentes disciplines allant des sciences sociales, à la psychologie et à la biologie ont critiqué cet abus depuis longtemps (voir Yoccoz, 1991 pour quelques références). Il devrait être inquiétant pour certains adeptes des tests de savoir que l'origine de la limite utilisée pour les tests, 0,05, vient d'un problème de droits d'auteurs entre deux monstres sacrés des statistiques, Karl Pearson et Ronald Fisher (Barnard, 1990). Pourtant, les synthèses récentes montrent une augmentation de la fréquence des tests (Anderson *et al.*, 2000) – et pas plus tard que le mois dernier, je pouvais lire la lettre d'un éditeur recommandant l'acceptation d'un article si l'auteur parvenait à changer le niveau de signification d'un test de 0,051 à 0,049.

Cet abus des tests d'hypothèse reflète aussi, et c'est peut-être plus embarrassant encore pour ce qui est de notre démarche scientifique, une vision simpliste de celle-ci : une hypothèse, une étude, un test. Je ne rejette pas, bien au contraire et j'y reviendrai plus loin, l'importance d'un cadre théorique fait d'hypothèses, de questions portant sur des mécanismes ou sur le fonctionnement d'un système. Mais ces hypothèses sont devenues le plus souvent complexes, leurs présupposés demandent à être évalués, et les facteurs qui nous préoccupent agissent rarement indépendamment les uns des autres : c'est une vision réductrice et souvent fautive d'essayer de séparer par exemple l'effet du climat et de la fragmentation des paysages, quand en fait une grande partie des effets peuvent être la conséquence de l'interaction entre ces deux facteurs (et d'autres bien sûr).

LE SUIVI DE LA BIODIVERSITÉ : INTÉGRER SCIENCE ET GESTION

Je me suis intéressé, avec des collègues américains et français, aux programmes de suivi de la biodiversité mis en œuvre, surtout dans les pays occidentaux. Notre analyse portait sur les objectifs de ces programmes, les méthodes utilisées aussi bien sur le terrain que dans les analyses, et enfin sur l'utilisation et l'interprétation des résultats (Yoccoz *et al.*, 2001).

Le suivi de la biodiversité, des gènes aux populations, communautés et écosystèmes, répond à des objectifs scientifique ou de gestion – l'un n'excluant pas l'autre – mais dans la grande majorité des cas, ces objectifs ne sont pas définis ou sont définis en termes vagues ou trop généraux, et donc non opérationnels. L'attitude est le plus souvent passive : acquérir une série d'observations, et si un test utilisant des techniques statistiques plus ou moins élaborées nous montre que quelque chose « se passe », c'est-à-dire en rejetant l'hypothèse invraisemblable que le monde qui nous entoure est constant, tirer une sonnette d'alarme en construisant une histoire « expliquant » les données.

Ces programmes sont très rarement mis dès leur initiation dans le cadre d'hypothèses multiples traduites en termes quantitatifs, sous forme de modèles dont les présupposés et les déductions peuvent être rigoureusement évalués. Par voie de conséquence, ces programmes ne permettent que très rarement de séparer des hypothèses, d'en privilégier certaines, parce que le plus souvent ces hypothèses sont construites a posteriori (Nichols, 1991). Bien sûr, la génération d'hypothèses est une

partie essentielle de l'activité scientifique, mais il faut bien aussi de temps à autre élaguer dans ce qui existe.

Je ne reviendrai pas ici sur les méthodes mises en œuvre, même si elles se révèlent aussi le plus souvent inadéquates : absence de stratégie d'échantillonnage, utilisation de techniques de comptage dont les biais et précision ne sont pas connus. Je pense plus intéressant dans le cadre des pratiques pluri-disciplinaires de considérer la dernière étape d'un programme : l'intégration des données et des modèles représentant les hypothèses du programme de suivi/gestion.

Cette intégration est possible si les hypothèses peuvent d'abord être traduites en terme de modèles statistiques. Ces modèles sont dérivés de modèles mathématiques qui d'une part traduisent quantitativement les hypothèses sur le fonctionnement du système suivi, et d'autre part doivent permettre de prédire l'évolution des variables pertinentes en terme de gestion. Ces modèles statistiques sont définis par deux types de paramètres : certains auront une interprétation dans le cadre des hypothèses retenues et des objectifs de gestion, et d'autres qui sont simplement nécessaires pour que le modèle statistique prennent en compte les propriétés essentielles des données (par exemple, la structure du plan d'observation/expérimental, et une variance décrivant les effets des facteurs non pris en compte par les autres paramètres, et donc supposés aléatoires). Un programme de suivi de populations chassées intégrera des modèles de dynamique de populations, et en particulier comment la mortalité naturelle et la mortalité due à la chasse interagissent⁴ (Nichols *et al.*, 1995). Un programme de suivi des effets de la fragmentation des paysages estimera les taux de colonisation et d'extinction des métapopulations ou méta peuplements du paysage (Boulinier *et al.*, 2001), et reliera ces taux à différentes hypothèses sur le fonctionnement de ces métapopulations (Hanski et Ovaskainen, 2000). Les modèles statistiques intégreront en particulier les différentes sources d'erreur associées à l'estimation des variables suivies, depuis les erreurs de mesure associées aux techniques de comptage jusqu'aux erreurs d'échantillonnage.

L'intégration des données et des hypothèses se fait alors en considérant la notion fondamentale en statistiques de vraisemblance (Fisher, 1922). Cette notion consiste à inverser la probabilité d'observer un ensemble de données étant donné un modèle et des valeurs des paramètres (un exercice de déduction, purement mathématique⁵) :

Prob (Données | (Modèle, Paramètres)) \rightarrow Vraisemb ((Modèle, Paramètres) | Données)

et d'utiliser cette vraisemblance afin de comparer des modèles et des paramètres (un problème d'induction).

4. Techniquement, on parlera de mortalité additive si ces deux sources de mortalité sont indépendantes, compensatoire dans le cas contraire. Parce que mortalités naturelle et associée à la chasse sont souvent saisonnières (hiver vs automne), une certaine prudence est requise dans l'interprétation de certains résultats (Boyce *et al.*, 1999).

5. Dans le cas de distribution continue (par exemple, une loi de Gauss), cette probabilité est nulle – on peut pour contourner cette difficulté théorique considérer que toute mesure est par nature discrète et donc on observe en fait une valeur comprise entre deux bornes.

La vraisemblance peut être utilisée à différents niveaux : pour estimer des paramètres et leur incertitude étant donné un modèle, pour comparer des modèles étant donné un jeu de données, pour obtenir une procédure permettant un aller-retour entre modèles et jeux de données multiples. Le premier est bien sûr le plus classique, et nous ramène au point développé précédemment : le test d'une hypothèse nulle se ramène souvent à celui de la vraisemblance relative d'un modèle où un des paramètres est supposé égal à 0 – si celle-ci est très faible, on rejette la valeur 0 pour le paramètre en question, c'est-à-dire l'hypothèse. Le deuxième a vu un développement important ces dernières années⁶, avec l'utilisation croissante (mais encore très minoritaire, si ce n'est dans certains types d'études comme l'estimation des paramètres démographiques) de critères de sélection de modèles qui sont souvent fonction de la vraisemblance des différents modèles (voir les critères d'Akaike ou de Schwarz *in* Miller, 2002). Le troisième est associé à une pratique Bayésienne, où la vraisemblance des différentes hypothèses ou modèles est utilisée pour actualiser nos degrés de crédibilités⁷ initiaux dans les différentes hypothèses. En particulier, un programme de suivi peut initialement donner le même poids ou crédibilité à toutes les hypothèses, et les actualiser tous les ans sur la base des données recueillies. Cette actualisation utilise le théorème de Bayes (Nichols *et al.*, 1995) :

$$Cred_{t+1}(\text{Modèle } _i | \text{Données } _t) = \frac{Cred_t(\text{Modèle } _i) \cdot Vraisemb_t(\text{Données } _t | \text{Modèle } _i)}{\sum_{\text{Modèle } _j} Cred_t(\text{Modèle } _j) \cdot Vraisemb_t(\text{Données } _t | \text{Modèle } _j)}$$

Ces degrés de crédibilité (que l'on peut interpréter comme des pondérations relatives des différents modèles) peuvent enfin être intégrés par rapport aux objectifs de gestion définis dans un programme de suivi. En effet, chaque modèle permet de calculer l'évolution attendue des variables de gestion, et l'incertitude concernant quel modèle est le plus cohérent avec les données est prise en compte par les poids relatifs des modèles. Une moyenne pondérée représentera la valeur attendue en terme de gestion.

La vraisemblance donne alors une représentation simple de l'apport à nos connaissances fournie par un ensemble de données : si les vraisemblances sont semblables d'un modèle à l'autre, ou si considérant les paramètres d'un modèle, la vraisemblance apparaît comme plate, distinguant peu des valeurs différentes des paramètres, les données sont pauvres. On peut ainsi comparer ou combiner des jeux de données divers, et voir quelles sont leurs contributions respectives (Schweder, 1998).

6. Akaike (Findley and Parzen, 1995) fait remarquer que l'utilisation de tels critères – de préférence par exemple aux tests – fut bien acceptée par les ingénieurs, nettement moins par les scientifiques (et encore moins par de nombreux statisticiens). Pour Akaike, les ingénieurs sont d'abord préoccupés par ce qui fonctionne en pratique, même si la théorie n'est d'un point de vue mathématique pas aussi satisfaisante.

7. J'évite ici de parler de probabilités, parce si mathématiquement cela ne pose pas de problèmes, il est difficile de penser qu'une hypothèse pourrait être vraie par exemple 40 % du temps (interprétation habituelle, mais restrictive, d'une probabilité).

Une telle approche intègre donc trois disciplines, avec des interactions fortes :

- les mathématiques, qui sont indispensables à la définition et à la compréhension du fonctionnement des modèles. Il est nécessaire en particulier de connaître les paramètres critiques des modèles – c'est-à-dire ceux qui sont susceptibles d'influencer le plus les variables de gestion – et de reconnaître ce qui dans la structure d'un modèle est à même d'influencer ces variables à court et à moyen terme. Il est par exemple inutile d'avoir dans l'ensemble des modèles des modèles donnant lieu à des prédictions pratiquement similaires ;
- les statistiques, qui permettent d'estimer la cohérence entre données et modèles. Bien entendu, cette cohérence sera d'autant mieux évaluée que les plans d'observation/expérimentaux seront construits de manière à distinguer les modèles, autrement dit, que les vraisemblances des différents modèles seront clairement différentes quelles que soient les données obtenues. La contribution à nos connaissances contenue dans un ensemble d'informations peut ainsi être estimée par les changements des vraisemblances relatives des différents modèles ;
- les sciences de l'environnement, qui définissent à la fois les hypothèses concernant le fonctionnement du système, et les objectifs de gestion. Dans les deux cas, il importe d'intégrer les composantes écologiques et socio-économiques.

COMMENT ENSEIGNER ET ADOPTER UNE ATTITUDE FAITE DE RIGUEUR ET DE PRAGMATISME DANS LES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT ?

Nous avons besoin de rigueur – dans la définition de nos objectifs, dans nos méthodes d'acquisition des données et leurs analyses, par exemple – mais aussi de pragmatisme : les critères de sélection de modèles ne sont qu'un outil approximatif, nous devons restreindre notre choix de modèles possibles sans essayer de prendre en compte toutes les variantes possibles, tout plan d'échantillonnage ou d'expérience doit intégrer une certaine robustesse face aux changements météorologiques, institutionnels ou autres. La pratique traditionnelle des tests statistiques paraissait rigoureuse, parce qu'elle prétendait séparer systématiquement le grain de l'ivraie. Malheureusement, elle ne peut pas s'adapter aux exigences complexes des problèmes posés dans les sciences de l'environnement. D'autres approches existent, et peuvent sans difficultés majeures être mises en œuvre dès aujourd'hui⁸.

Cette double exigence doit en plus intégrer une approche pluri-disciplinaire, c'est-à-dire que ce pragmatisme et cette rigueur doivent s'exercer au sein de chaque discipline, mais aussi vis-à-vis des autres disciplines impliquées. Les sciences de l'environnement, dans la mesure où elles font appel à des outils très divers, des hypothèses portant sur les mécanismes écologiques aux modèles statistiques et mathématiques, ont besoin de scientifiques ayant une approche qui permet de simplifier, afin de pouvoir communiquer et aller à l'essentiel, mais rigoureuse, dans le

8. Ces dernières années ont vu le développement très rapide de méthodes numériques permettant le calcul des degrés de crédibilité *a posteriori*, sans avoir recours à des calculs analytiques. Ces méthodes, comme celles utilisant les simulations MCMC (Markov chain Monte Carlo), sont de plus en plus fréquemment utilisées, y compris en écologie (Link *et al.*, 2002 ; O'Hara *et al.*, 2002).

sens où nous devons savoir en quoi ces compromis pourraient... compromettre nos conclusions ou décisions. Mon expérience d'écologue de terrain et de biométricien est un aller-retour constant entre un souhait théorique d'utiliser des approches statistiques permettant des inférences rigoureuses, comme la randomisation des plans d'expérience, et la nécessité pratique qui conduit le plus souvent à réaliser des études observationnelles (il est difficile de randomiser l'effet du climat sur une population de rennes !). Mais c'est bien la compréhension du rôle joué par la randomisation dans les plans d'expérience qui aide à construire des plans d'observation permettant des inférences plus robustes.

Comment enseigner une telle pratique ? Il est tellement plus facile en effet de se restreindre à un cadre mathématique strict, par exemple en statistiques, et d'oublier que l'intérêt d'une méthode est d'abord en terme de ce qu'elle apporte aux disciplines où on l'emploie. Comment enseigner, pour reprendre GEP Box, que les modèles sont tous faux, mais que certains sont utiles (Yoccoz, 1999), sans aboutir à un rejet pur et simple de l'emploi des modèles⁹ ? Il est assez révélateur de constater qu'il existe un grand nombre d'ouvrages d'enseignement de très bonne qualité dans chacune des disciplines, mathématiques, statistiques et environnement, mais qu'il n'en existe pas à ma connaissance qui expose de manière convaincante comment pratiquer cet aller-retour entre les disciplines (mais voir Legay, 1997). Ce dont nous avons besoin est d'un certain nombre d'exemples « grandeur nature », qui ne soient pas des simples exemples d'applications permettant de vérifier si on sait faire tourner un programme, et qui montrent l'apport d'une telle approche pluri-disciplinaire. Aalen (2000) faisait récemment remarquer que de tels exemples manquaient en statistiques médicales – il nous reste à prouver que de tels exemples existent dans le domaine des sciences de l'environnement. D'une façon pratique, cette perspective pourra être atteinte progressivement, mais demande dès maintenant une prise en compte de ces aspects par les différents acteurs.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AALLEN O. O., 2000, Medical statistics – no time for complacency, *Statistical Methods in Medical Research*, 9, p. 31-40.
- ANDERSON D. R., K. P. BURNHAM, & W. L. THOMPSON, 2000, Null hypothesis testing: Problems, prevalence, and an alternative, *Journal of Wildlife Management*, 64, p. 912-923.
- BARNARD G. A., 1990, Must clinical trials be large? The interpretation of P-values and the combination of test results, *Statistics in Medicine*, 9, p. 601-614.
- BEST J., 2001, *Damned lies and statistics: untangling numbers from the media, politicians and activists*, San Diego, University of California Press.

9. On peut rappeler ici le rejet par une majorité de politiciens américains de l'utilisation de modèles statistiques développés pour corriger le biais du recensement décennal. Il existe des raisons politiques – le biais affecte surtout des circonscriptions démocrates – mais il y a plus fondamentalement une incompréhension majeure du rôle joué par les modèles statistiques.

- BOULINIER T., J. D. NICHOLS, J. E. HINES, J. R. SAUER, C. H. FLATHER & K. H. POLLOCK, 2001, Forest fragmentation and bird community dynamics: Inference at regional scales, *Ecology*, 82, p. 1159-1169.
- BOYCE M. S., A. R. E. SINCLAIR & G. C. WHITE, 1999, Seasonal compensation of predation and harvesting, *Oikos*, 87, p. 419-426.
- FINDLEY D. F. & E. PARZEN, 1995, A conversation with Hirotogu Akaike, *Statistical Science*, 10, p. 104-117.
- FISHER R. A., 1922, On the mathematical foundations of theoretical statistics, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, London, A 222, p. 309-368.
- HAND D. J., G. BLUNT, M. G. KELLY & N. M. ADAMS, 2000, Data mining for fun and profit, *Statistical Science*, 15, p. 111-126.
- HANSKI I. & O. OVASKAINEN, 2000, The metapopulation capacity of a fragmented landscape, *Nature*, 404, p. 755-758.
- KHUN T., 1962, *The Structure of Scientific Revolutions*, The University of Chicago Press ; 2^e éd., 1970 ; trad. fr., 1983, *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion.
- LEGAY J.-M., 1997, *L'expérience et le modèle. Un discours sur la méthode*, INRA Éditions, Paris.
- LINK W. A., E. CAM, J. D. NICHOLS & E. G. COOCH, 2002, Of BUGS and birds: Markov chain Monte Carlo for hierarchical modeling in wildlife research, *Journal of Wildlife Management*, 66, p. 277-291.
- LOMBORG B., 2001, *The skeptical environmentalist*, Cambridge, Cambridge University Press.
- MILLER A. J., 2002, *Subset selection in regression*, Second edition, London, Chapman and Hall/CRC.
- NELDER J. A., 1986, Statistics, science and technology, *Journal of the Royal Statistical Society*, A 149, p. 109-121.
- NICHOLS J. D., 1991, Science, population ecology, and the management of the American black duck, *Journal of Wildlife Management*, 55, p. 790-799.
- NICHOLS J. D., F. A. JOHNSON & B. K. WILLIAMS, 1995, Managing North American waterfowl in the face of uncertainty, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 26, p. 177-199.
- O'HARA R. B., E. ARJAS, H. TOIVONEN & I. HANSKI, 2002, Bayesian analysis of metapopulation data, *Ecology*, 83, p. 2408-2415.
- OLKIN I., 1995, Meta-analysis: reconciling the results of independent studies, *Statistics in Medicine*, 14, p. 457-472.
- SCHWEDE T., 1998, Fisherian or Bayesian methods of integrating diverse statistical information? *Fisheries Research*, 37, p. 61-75.
- YOCOZ N. G., 1991, Use, overuse and misuse of significance tests in evolutionary biology and ecology, *Bulletin of the Ecological Society of America*, 72, p. 106-111.
- YOCOZ N. G., 1999, Évolution de l'utilisation des statistiques : quelques réflexions sur le rôle des modèles, *Nature Sciences Sociétés*, 7, p. 14-18.
- YOCOZ N. G., J. D. NICHOLS & T. BOULINIER, 2001, Monitoring of biological diversity in space and time, *Trends in Ecology and Evolution*, 16, p. 446-453.

Chapitre 12

Changements paysagers et transmission de l'échinocoque alvéolaire*

INTRODUCTION

Le contexte

Plus de 60 % des agents pathogènes humains ont une origine animale directe ou un lien indirect avec la faune sauvage et les animaux domestiques (Dazak *et al.*, 2000 ; Cleaveland *et al.*, 2001). La perturbation des écosystèmes, à travers des processus naturels ou non, est un des principaux facteurs de l'émergence ou de la ré-émergence des maladies infectieuses (Morens *et al.*, 2004). Les changements paysagers induits par l'activité humaine, par exemple la déforestation, les aménagements hydrologiques, les réaffectation de terres agricoles, sont la cause fréquente de l'émergence de zoonoses (Patz *et al.*, 2004). Les modalités et les mécanismes responsables du passage d'un écosystème apparemment stable du point de vue de sa situation épidémiologique à une situation de propagation zoonotique épidémique ne sont cependant pas complètement compris, notamment pour les maladies non-vectorielles pour lesquelles les petits rongeurs sont un réservoir (Abramson et Kenkre, 2002).

Le déclin mondial des zones forestières dans les pays émergents a des conséquences dramatiques sur la perte de biodiversité (Kittredge, 1996). C'est le cas en Chine où la population a doublé depuis les années cinquante avec un besoin concomitant colossal en bois et en terres cultivées. Pendant les 300 dernières années (de 1700 à 2000) environ 180 millions d'hectares de forêts et 65 millions d'hectares de pâtures ont été perdus, alors que les zones cultivées croissaient de 54 millions d'hectares pendant la période 1950-2000 (Houghton et Hackler, 2003). Le gouvernement chinois a maintenant ralenti ce taux de déforestation alarmant et cherche à re-forester les paysages érodés et à contrôler le surpâturage dans les prairies des hauts plateaux tibétains. Au contraire, dans les montagnes de l'Europe de l'Ouest, les mutations économiques de la deuxième moitié du vingtième siècle ont entraîné des changements d'utilisation des terres, la déprise agricole et en conséquence une augmentation très importante des surfaces forestières. Dans ces régions (ex. les Alpes

* Chapitre rédigé par Patrick GIRAUDOUX, Philip S. CRAIG et Dominique VUITTON

du Nord et le massif du Jura), l'agriculture s'est spécialisée dans la production de lait dans les années soixante et a reconverti la plupart des terres cultivées en prairie permanente (Giraudoux *et al.*, 1997).

Savoir si les relations entre la perturbation anthropogénique des écosystèmes et la transmission des pathogènes peuvent être décrites dans un modèle général constitue donc une question fondamentale. Un tel modèle serait la synthèse réaliste et appliquée de paramètres clés décrivant l'écologie des hôtes, les structures socio-économiques et la dynamique de transmission du pathogène aussi bien dans son cycle sauvage et/ou domestique que dans la manière dont l'homme peut-y être exposé. L'objectif de ce type de recherche est donc par essence pluridisciplinaire, puisque aucun champ disciplinaire particulier ne peut espérer répondre seul à cette question à la fois fondamentale et finalisée.

132

La problématique spécifique et le modèle biologique

Le cycle de vie de l'échinocoque multiloculaire, *Echinococcus multilocularis* (Em) implique des petits mammifères comme hôtes intermédiaires et les renards, *Vulpes sp.*, mais aussi les chiens et peut-être les chats comme hôtes définitifs (Rausch 1995). L'homme s'infecte, directement ou par de la nourriture souillée, en ingérant des œufs produits par les vers adultes et dispersés dans l'environnement par les crottes des carnivores (*figure 1*). Ce parasite est largement répandu dans l'hémisphère nord (Schantz *et al.*, 1995) où il est considéré comme causant la zoonose la plus pathogène de l'Arctique et des contrées tempérées. La cible primaire du parasite chez l'homme, hôte accidentel, est le foie où il prolifère lentement, mais des métastases parasitaires peuvent également se localiser dans des organes aussi distants du foie que le cœur, le poumon ou le cerveau. Le pronostic de l'échinococcose alvéolaire s'est amélioré dans les deux dernières décennies dans les pays où une chirurgie appropriée mais toujours complexe peut être pratiquée et où la chimiothérapie prolongée par albendazole peut être proposée aux patients. La maladie est létale en cas de diagnostic tardif ou dans les pays où l'accès au soin est difficile (Vuitton *et al.*, 2003).

Plus de 40 espèces de petits mammifères (principalement des rongeurs et, de plus, en Chine des petits lagomorphes portant de nom de Pika, *Ochotona sp.*), sont connus pour être les hôtes intermédiaires de ce parasite, hébergeant dans leur foie la forme larvaire du parasite (Schantz *et al.*, 1995). Les obstacles principaux à l'étude de l'écologie de sa transmission et à sa modélisation déterministe sont, chez ces hôtes intermédiaires, les basses prévalences mesurées même dans les zones de haute endémie (< 1 ‰), et l'agrégation spatiale de la distribution en micro-foyers de quelques dizaines de mètres, extrêmement hasardeux à découvrir, où les prévalences peuvent alors dépasser quelques 10 % (Giraudoux *et al.*, 2002). La mesure d'une prévalence chez une espèce de petits mammifères donnée apporte donc peu d'information sur le type de transmission (cette espèce peut être un cul-de-sac épidémiologique si elle est pas ou peu consommée par un hôte définitif convenable ou si elle ne conduit pas la larve parasitaire à une complète maturité) et les très basses prévalen-

ces habituellement mesurées empêchent toute comparaison statistique entre espèces. De plus, la structure des populations des hôtes intermédiaires aussi bien que définitifs est très variable et techniquement difficile, voire impossible à mesurer, ne serait-ce que par exemple leur densité absolue. Enfin, la longue durée de développement asymptomatique du parasite chez l'homme (de 5 à 20 ans), très variable d'un individu à l'autre, pose des problèmes épidémiologiques spécifiques, notamment dans le cadre d'enquêtes épidémiologiques menées sur les lieux, en terme de périodes d'exposition et de recherche de la période de contamination (Craig *et al.*, 1996). Les prévalences humaines sont le résultat cumulé d'événements et d'expositions qui peuvent avoir eu lieu des années ou des dizaines d'années avant l'observation de la maladie, et, en conséquence, on ne peut pas aisément extrapoler rétrospectivement à cette échelle de temps les résultats obtenus chez les hôtes animaux à une date donnée sur une période de temps généralement très courte (quelques mois ou dizaines de mois d'étude) et à une échelle spatiale restreinte.

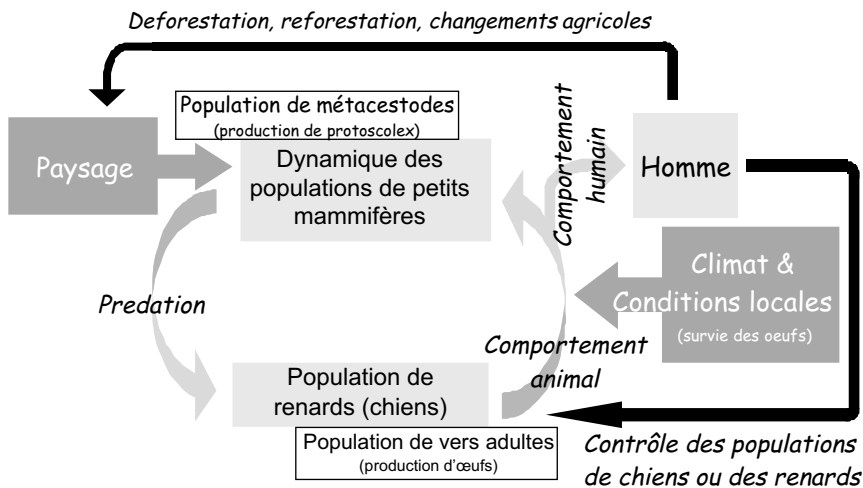


Figure 1. Cycle de l'échinocoque alvéolaire et facteurs écologiques susceptibles de moduler la transmission, d'après Giraudoux *et al.* 2003.

Si l'on considère maintenant la distribution mondiale du parasite, elle est d'évidence liée aux climats froids arctiques et continentaux, ce qui s'explique par la sensibilité de ses œufs à la chaleur modérée et à la déshydratation (Veit *et al.*, 1995). Cependant, cette propriété est partagée avec d'autres espèces de Taeniides qui ont, eux, une distribution mondiale, et elle ne peut donc pas expliquer à elle seule la spécificité de la distribution de l'échinocoque alvéolaire (Lucius et Bilger, 1995).

Dans le cas présent, le défi était donc de comprendre quelles conditions naturelles et anthropiques pouvaient déterminer un système stable ou localement renforcer l'intensité de la transmission et/ou l'exposition humaine. Il a été relevé en réunis-

sant les compétences d'équipes de recherche couvrant les champs disciplinaires suivants : écologie, épidémiologie humaine et vétérinaire, médecine clinique et radiologique, géographie, immunologie, biologie et génétique moléculaire, et en créant les conditions nécessaires à la définition d'objectifs communs et à l'interfaçage des compétences (figure 2). Le but de cet article est de montrer le principe de la méthode adoptée, la portée de son développement en cours et de discuter ensuite la place de ce type d'approche dans le contexte scientifique français.

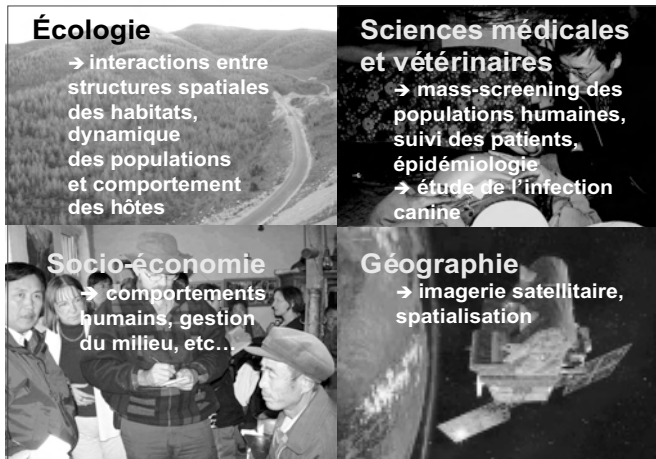


Figure 2. Champs disciplinaires et domaines de compétences mis en œuvre.

Le canon de la démarche opérationnelle utilisée ici sera illustré par l'un des chantiers de cette étude. Il s'agissait de comparer deux systèmes de transmission de l'échinocoque alvéolaire, l'un situé dans l'Est de la France et l'autre en Chine, dans le Sud du Gansu, afin d'en détecter les invariants écologiques et épidémiologiques. Le foyer français avait fait l'objet d'études préalables, sur le long terme, en épidémiologie humaine (Bresson-Hadni *et al.*, 1994) et vétérinaire (Giraudoux, 1991), et aussi en écologie des populations d'hôtes et des cestodes hépatiques dont l'échinocoque alvéolaire (Delattre *et al.*, 1985 ; Delattre *et al.*, 1988 ; Delattre *et al.*, 1990 ; Giraudoux, 1991). L'équipe de Salford avait quant à elle découvert avec le Collège médical de Lanzhou le foyer épidémiologique de haute prévalence situé dans le Sud du Gansu, en Chine et suggéré un rôle, inhabituel pour l'époque, du chien dans le fonctionnement du cycle et la contamination de l'homme (Craig *et al.*, 1992).

ÉPIDÉMIOLOGIE PAYSAGÈRE ET DISTRIBUTION DES PETITS MAMMIFÈRES

En Chine, les études ont été menées dans les préfectures de Zhang et Puma, dans le Sud du Gansu (Craig *et al.*, 2000). La zone (650 km²) est caractérisée par de petits villages de 200 à 1 500 habitants situés dans des vallées entre 2400 et 2600 m d'altitude. Ils sont peuplés uniquement de fermiers Hans impliqués dans une agricul-

ture de subsistance. La prévalence canine de l'échinocoque alvéolaire était de 10 % en 1991 (Craig *et al.*, 1992), mais des campagnes de contrôle des pullulations de rongeurs ont ensuite indirectement éliminé totalement les chiens par empoisonnement secondaire, et les enquêtes menées auprès d'anciens chasseurs de renards témoignent d'une réduction drastique et concomitante des effectifs de renards roux pendant les 10-15 dernières années, et de fait aucun indice de présence n'a pu être relevé pendant la période d'étude malgré une recherche active.

Un total de 3 331 personnes furent incluses sur la base du volontariat dans un programme de dépistage épidémiologique des populations mené de 1994 à 1996. Les personnes étaient enregistrées en un point central dans chaque village (école, dispensaire, maison, etc.) ainsi que leurs réponses à un questionnaire sur leurs habitudes et pratiques. Chacune bénéficiait ensuite d'un examen échographique du foie et 4 gouttes de sang étaient prélevées sur du papier filtre. Chez les personnes présentant une image hépatique anormale étaient prélevés, de plus, 5 ml de sang veineux. Un diagnostic était ensuite porté sur la base des résultats échographiques et immunologiques, et les patients atteints d'une lésion au foie étaient pris en charge médicalement. Une échinococcose alvéolaire fut confirmée chez 145 patients (prévalence : 4,1 %). L'âge moyen des patients était de 41 ans (11-72 ans). Des différences significatives de prévalence furent également observées selon le sexe, les femmes se révélant plus fréquemment atteintes que les hommes.

La couverture végétale au sol fut étudiée sur la base de cartes au 1:100 000 établies en 1989, fournies par le gouvernement local, et confirmées par nous-mêmes par des transects pédestres sur le terrain. Les observations de terrain (souches encore présentes dans les friches, etc.) ont montré que le paysage actuel est le résultat de 15-20 ans de déforestation commencée dans les années soixante-dix. Il fut confirmé par les autorités locales et les agriculteurs que les zones avec une plus grande proportion de champs labourés étaient bien celles qui avaient été déforestées en premier, et que les zones où la proportion était plus basse l'avaient été récemment. Les surfaces de labours, de forêt et de landes furent donc stratifiées en secteurs homogènes en fonction de la proportion respective de chacun de ces types d'habitats.

Le département du Doubs est localisé dans l'Est de la France à une altitude comprise entre 100 et 1 450 m. Il est divisé en 24 cantons. Les données sur la population humaine furent obtenues de l'Insee pour les recensements de 1975, 1980 et 1990. L'effectif de la population n'ayant pas beaucoup changé (+ 2,98 %) pendant cette période, l'effectif moyen des trois recensements fut utilisé pour estimer les prévalences par canton. Le diagnostic et l'identification des cas humains avait été entrepris depuis 1971 au CHU de Besançon, qui est le centre régional de référence pour cette maladie. L'estimation de la prévalence à partir de cas symptomatiques a été complétée par un dépistage systématique fait parmi les bénéficiaires de la Mutualité sociale agricole avec l'aide des équipes de médecine préventive de cet organisme (Bresson-Hadni *et al.*, 1994). Les données compilées rétrospectivement de 1971 à 1997 furent utilisées (total 83 patients, prévalence 1,74 : 10 000).

Les données d'utilisation des sols furent fournies par le Recensement général agricole (RGA) de 1988 et l'inventaire forestier national du ministère de l'Agricul-

ture. La variable gardée pour cette étude fut le *ratio* de prairie permanente sur la surface totale du canton. Ce *ratio* n'avait pas changé significativement depuis la fin des années soixante-dix (Giraudoux *et al.*, 1997). Comme la prévalence humaine était d'évidence beaucoup plus basse dans les cantons urbains (les enquêtes épidémiologiques avaient en effet montré que le risque était à l'époque essentiellement rural, Vuitton *et al.*, 1990), ceux-ci ne furent pas inclus dans la suite de l'étude.

Dans les deux pays, les petits mammifères furent échantillonnés selon deux techniques : (1) le piégeage sur ligne standard dans chaque type d'habitat des paysages (Giraudoux *et al.*, 1994 ; Giraudoux *et al.*, 1998) et (2) des méthodes indiciaires par transects paysagers (Giraudoux *et al.*, 1995 ; Delattre *et al.*, 1996, Giraudoux *et al.*, 1997 ; Craig *et al.*, 2000 ; Duhamel *et al.*, 2000), et en Chine, cette étude fut complétée par l'examen des rongeurs spontanément apportés par les agriculteurs.

Il fut ainsi montré pour la zone d'étude en Chine que les prévalences humaines étaient trois fois plus élevées dans les secteurs à fort *ratio* de landes de déforestation (prévalences par village variant de 0 à 16 %). Un type de distribution similaire fut observé en France en fonction du *ratio* de prairie permanente sur la surface totale (*figure 3*).

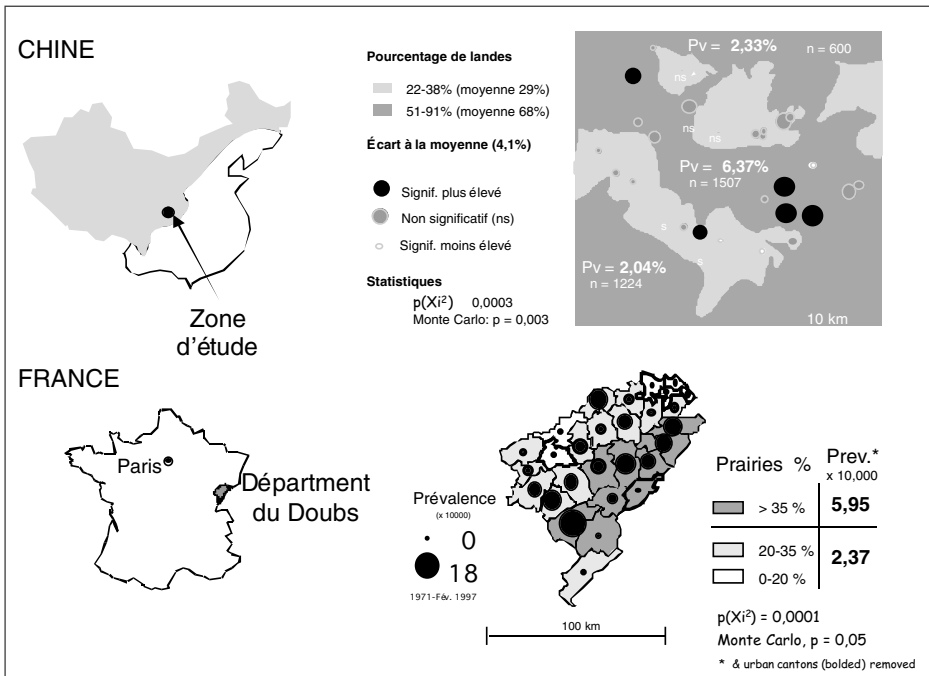


Figure 3. Prévalences de l'échinococcose alvéolaire humaine dans le Sud du Gansu et dans le département du Doubs.

En Chine, les cercles représentent les villages et leur taille est proportionnelle aux prévalences observées. Pv_1 , Pv_2 , Pv_3 prévalences dans les trois zones paysagères, n_1 , n_2 , n_3 , nombre de personnes examinées. Dans le département du Doubs, les cercles sont proportionnels aux prévalences observées dans chaque canton (d'après Giraudoux *et al.*, 2003).

La figure 4 montre la distribution des assemblages d'espèces de petits mammifères dans les deux paysages. Des espèces potentiellement hôtes (physiologiquement compatibles) furent observées dans tous les habitats.

La compréhension de ces résultats épidémiologiques nécessite ici un détour par l'écologie.

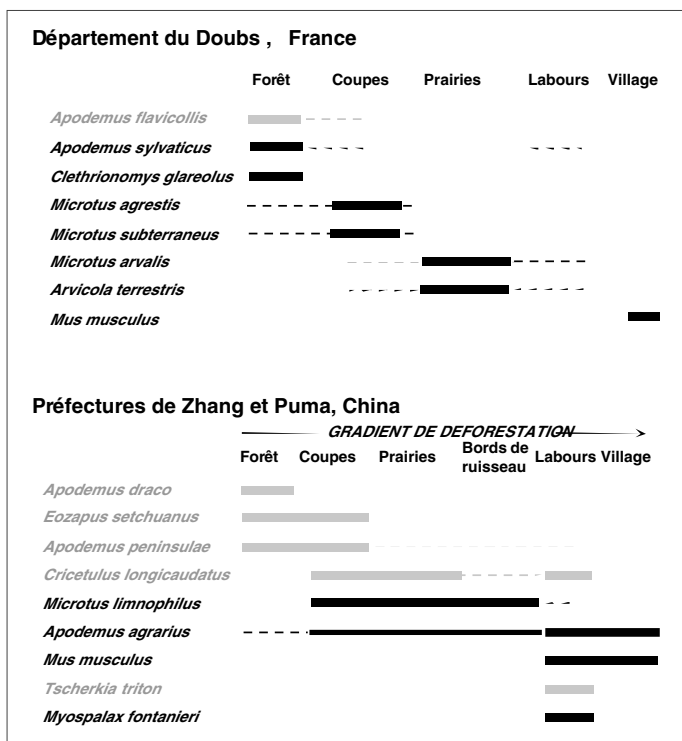


Figure 4. Distribution des principales espèces dans les paysages du Sud du Gansu et du département du Doubs.

Les espèces en noir sont des hôtes potentiels du parasite, la susceptibilité de celles en gris est inconnue. L'épaisseur des lignes indique la densité relative de chaque espèce dans les habitats-types (d'après Giraudoux *et al.*, 2003).

QUE SAVONS-NOUS DES INTERACTIONS PAYSAGES – PETITS MAMMIFÈRES – ZONOSSES ?

L'influence du paysage sur la distribution des petits mammifères et la distribution des pathogènes n'est pas un nouveau concept (Pawlovski, 1964) et a été démontré pour de nombreuses maladies infectieuses à transmission vectorielle : leishmanioses, rickettsioses, peste et certaines autres parasitoses comme les bilharzioses et plus récemment certains hantavirus. Dans tous les cas, il s'agissait d'une seule espèce-réservoir principal, liée à un habitat particulier. Par exemple, la transmission de la *Leishmania major* au Maroc s'accroît dans les oasis à proximité de dépôts d'ordure où le réservoir principal, *Meriones shawi*, et l'insecte vecteur, *Phlebotomus papatasi*,

atteignent de hautes densités, et aussi pendant les périodes humides qui déterminent une ressource de nourriture végétale accrue pour la population de Meriones (Rioux *et al.*, 1990). Ces études ont établi un lien entre habitats favorables à un réservoir d'hôte spécifiquement unique, qualité des ressources et transmission.

Les êtres vivants sont clairement sensibles aux variations de l'organisation spatiale de leur habitat optimal dans un paysage (Lidicker, 1995). Un aspect de cet effet du paysage c'est l'impact qu'il peut avoir sur la dynamique des espèces de mammifères. William Lidicker a proposé une manière de conceptualiser cet effet sur les populations de petits mammifères *Arvicolidae* (Lidicker, 1985 ; Lidicker 1991 ; Lidicker, 2000). Son hypothèse, appelée Rompa (*Ratio of Optimal to Marginal Patch Area*), peut se résumer par l'idée que la probabilité qu'une population d'arvicolidés subisse des cycles pluriannuels dus à l'effet combiné de la dispersion individuelle et de la prédation est liée à la proportion d'habitat optimal dans le paysage. Si les habitats optimaux sont en faible proportion, la matrice paysagère sert de puits de dispersion, et les densités sont toujours stables et faibles. À très haute proportion d'habitats optimaux, les densités de rongeurs sont stables et hautes (la dispersion s'opère dans des habitats optimaux et les puits de dispersion et la prédation sont insuffisants pour réduire la densité des populations). À proportion intermédiaire d'habitats optimaux, des cycles pluriannuels sont probables (Lidicker, 1995 ; Hansson, 2002). La densité moyenne d'une population d'arvicolidés peut donc être décrite comme une fonction non linéaire de cette proportion (Rompa). De plus, le type de communautés de prédateur et de relation proies-prédateurs semble changer avec la structure du paysage et la proportion des habitats les plus productifs (Angelstam *et al.*, 1984 ; Hansson, 1990 ; Hansson, 1995).

Ce type d'analyse appliqué ici à l'échinocoque alvéolaire, produit, à notre connaissance, la première indication que la transmission d'un parasite pourrait être dépendante d'interactions entre le Rompa de certaines espèces et la dynamique de leur population, dans un contexte où des hôtes potentiels existent dans tous les habitats des paysages étudiés. De plus, la comparaison entre les études menées dans le Doubs et le Sud du Gansu montre que, malgré le fait que les deux zones ne partagent aucune espèce dominante et que les habitats et évolutions paysagères sont totalement différents, les *patterns* et peut-être alors les processus impliqués pourraient être les mêmes.

ASSEMBLAGES D'HÔTES ET *PATTERNS* DE TRANSMISSION DANS LES MONTAGNES DU JURA

Dans l'Est de la France, des études de terrain menées sur le long terme (1978-1996) corroborent l'hypothèse Rompa à échelle régionale pour deux espèces d'arvicolidés vivant dans les prairies permanentes, *Microtus arvalis* et *Arvicola terrestris*. De fréquentes pullulations se produisent quand le pourcentage de prairie permanente dépasse certaines valeurs (50 % et 85 % de la surface agricole utilisées en prairie permanente pour *M. arvalis* et *A. terrestris*, respectivement) (Delattre *et al.*, 1992 ; Giraudoux *et al.*, 1997). Dans de tels systèmes, les renards spécialisent leur régime

alimentaire dont l'essentiel est alors constitué de rongeurs de prairies, leur régime ne se diversifiant que pendant les phases de faible densité de ces espèces (Weber et Aubry, 1993 ; Giraudoux *et al.*, 2002). La composition du paysage détermine à la fois la dynamique des espèces de rongeurs et celle des relations proies-prédateurs et donc peut influencer sur toute relation hôte – parasite qui dépend de cette relation. Dans le département du Doubs, les zones où les pullulations de rongeurs de prairies durent le plus longtemps sont aussi celles où l'on observe les prévalences chez l'homme les plus élevées (Viel *et al.*, 1999). Les prévalences de l'infection par les échinocoques adultes chez le renard sont de façon similaires plus élevées dans ces zones (Giraudoux 1991, Giraudoux *et al.*, 2001). Il a également été montré que la cause majeure de l'accroissement des fluctuations interannuelles des densités de population d'*A. terrestris* a été l'accroissement des surfaces en prairie permanente des années cinquante aux années soixante-dix (Giraudoux *et al.*, 1997). En Europe, Pesson et Carbiener (1989) en Alsace et Tackmann *et al.* (1998) dans le BrandenBurg en Allemagne, ont aussi établi un lien entre la prairie permanente et des prévalences plus élevées de l'échinocoque alvéolaire chez le renard.

ASSEMBLAGES D'HÔTES ET PATTERNS DE TRANSMISSION DANS LE SUD DU GANSU

Dans le Sud du Gansu, des prévalences chez l'homme 100 fois plus élevées que dans le Doubs, pourtant considéré comme une zone de haute endémicité, ont été mesurées. Au-delà de cette différence le même type de distribution a été observé, correspondant à des différences paysagères. Pourtant, des hôtes potentiels convenables existent dans tous les habitats en France comme dans le Gansu (*figure 4*). Cela signifie que l'intensité de la transmission dépend de la surface de certains habitats, ou de la densité des hôtes dans ces habitats ou des deux. Dans le Sud du Gansu où l'enquête épidémiologique a été menée, deux espèces de rongeurs dominaient les stades intermédiaires du gradient de déforestation : *Microtus limnophilus* un campagnol, et *Cricetulus longicaudatus*, un hamster (Giraudoux *et al.*, 1998). *M. limnophilus* et *M. oeconomus* sont des espèces jumelles qui ne peuvent être distinguées que par leur caryotype. L'aire de distribution de *M. limnophilus* a d'ailleurs été déplacée de près de 2 000 km vers le sud par notre étude (Malygin *et al.*, 1990 ; Courant *et al.*, 1999). *M. oeconomus* est l'hôte « par excellence » d'*E. multilocularis* en Alaska et en Sibérie où ce campagnol peut atteindre de très fortes densités (Rausch, 1995). La susceptibilité de *C. longicaudatus* à *E. multilocularis* n'est pas connue, mais *Cricetulus kamensis*, une espèce proche a été récemment trouvée infectée sur le plateau tibétain du Sichuan, en Chine (Raoul *et al.*, 2005) et *Cricetulus griseus*, est utilisé pour maintenir des isolats d'*Echinococcus multilocularis* (Sakamoto *et al.*, 1996). Des études de laboratoire ont prouvé que *M. limnophilus* est très susceptible et produit une grande quantité de protoscolex, l'élément contaminant issu de la larve pour les carnivores définitifs (Zhou *et al.*, 1998), comme toutes les espèces du genre *Microtus* (Rausch, 1995). La dynamique des populations de rongeurs forestiers est connue pour être beaucoup plus stable que celle des zones déforestées (Hsia, 1958, Hsia et Chu,

1963) ou de prairies (Giraudoux *et al.*, 1994). La déforestation dans le Sud du Gansu pendant les 30 dernières années a conduit à une extension importante des landes et prairies, donc des habitats optimaux pour *M. limnophilus* et *Cricetulus longicaudatus*. On peut donc légitimement poser l'hypothèse que le pourcentage d'habitat optimal devint critique pour ces espèces et a déclenché des pullulations. Précisément, *M. limnophilus* et *C. longicaudatus* étaient mentionnées comme pestes agricoles pour les prairies du Sud de Gansu au début des années quatre-vingt (Chen *et al.*, 1982). Les agriculteurs chinois interrogés ont confirmé que cette période coïncidaient avec de hautes densités de renards, *Vulpes vulpes*, et de très nombreux chiens domestiques dans les villages (par ailleurs observés dans les première missions réalisées à la fin des années quatre-vingt, Craig *et al.*, 1992). Toutes ces conditions furent assurément favorables à la transmission d'*Echinococcus multilocularis* avec pour résultat la forte prévalence de la maladie chez l'homme de 10 à 15 années plus tard. La figure 5 résume la dynamique de cette succession.

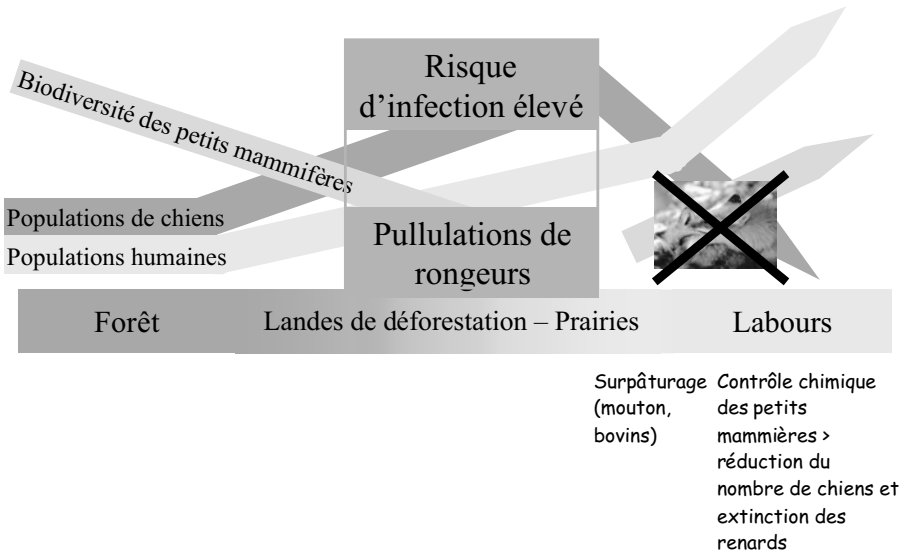


Figure 5. Évolution temporelle du système éco-épidémiologique responsable de la transmission de l'échinocoque alvéolaire dans le Sud du Gansu.

FORCES ET PROLONGEMENT DE CETTE APPROCHE PLURIDISCIPLINAIRE

Le lecteur aura compris que l'avancée relative des connaissances dans le domaine de l'écologie de la transmission de l'échinocoque alvéolaire est moins venue d'un approfondissement étroit d'une approche écologique strictement dynamique, déterministe et autocentrée, que de la confrontation pragmatique de résultats quantitatifs et semi-quantitatifs obtenus en épidémiologie humaine et en écologie du paysage et des communautés de rongeurs, visant à typer des systèmes en les comparant à différentes échelles spatiales (Giraudoux *et al.*, 1996 ; Giraudoux *et al.*, 2002).

La seule tâche réellement abordable, du fait de la complexité des paramètres responsables de la transmission et de leur estimation, était bien d'élaborer un modèle intégratif à des niveaux d'organisation inclusifs plus larges. Il s'agissait de déterminer quelles variables environnementales globales sont, dans le monde réel, généralement liées à des variations dans la transmission, et de là quels processus écologiques et comportementaux sont impliqués dans un système donné, en utilisant alors les méthodes comparatives et expérimentales ou quasi-expérimentales de l'écologie et de l'épidémiologie (Giraudoux *et al.*, 2003). Cette démarche a été poursuivie depuis, et la popularisation du GPS à la fin des années quatre-vingt-dix, en permettant le géo-référencement systématique de chaque donnée épidémiologique et écologique ainsi que l'incorporation consécutive des méthodes issues des géostatistiques et de l'analyse de données satellitaires l'ont considérablement renforcée et étendue. Elle conduit maintenant à l'établissement de modèles spatiaux utilisant des variables globales (paysages quantifiés, activité humaine, types de dynamiques des populations d'hôtes, etc.) contrôlant de manière *top-down* la hiérarchie des facteurs écologiques, anthropogéniques, et peut-être à terme génétiques, expliquant les variations spatiales et temporelles de transmission du parasite (Godot *et al.*, 2000 ; Danson *et al.*, 2003 ; Zhang *et al.*, 2003 ; Danson *et al.*, 2004 ; Graham *et al.*, 2004 ; Pleydell *et al.*, 2004). Le test du bien fondé de la démarche est actuellement conduit dans un programme soutenu depuis cinq ans par les National Institutes of Health et la National Science Foundation des États-Unis, et renouvelé pour trois ans cette année, en élargissant notamment la zone d'étude aux hauts plateaux tibétains et leurs contreforts et au nord des Liu Pan Shan au sud de la province du Ningxia. À l'échéance 2005 de ce programme, le bilan suivant a pu être présenté à nos financeurs (Craig *et al.*, 2005) : l'épidémiologie et l'écologie de la transmission de l'échinococcose alvéolaire et de son agent pathogène l'échinocoque alvéolaire étaient virtuellement inconnue sur le plateau tibétain avant l'année 2000. De 2000 à 2005, une équipe multi-disciplinaire impliquant neuf universités et instituts de Chine, d'Europe et des États-Unis a commencé à travailler dans l'Ouest du Sichuan et dans le Sud du Gansu et du Ningxia. Les résultats majeurs sont à ce jour les suivants :

- le plateau tibétain est un foyer majeur et actif de transmission d' *E. multilocularis* et l'échinococcose alvéolaire humaine y est un problème majeur de santé publique : en se fondant sur l'analyse du dépistage écho-sérologique de près de 8 000 sujets des zones potentiellement à risque, on peut affirmer que l'Est du plateau tibétain présente les plus hautes prévalences humaines mondiales (Budke *et al.*, 2004 ; Li *et al.*, 2005). Les hôtes définitifs sauvages sont deux espèces de renard (*Vulpes ferrilata*, *V. vulpes*) mais le chien domestique constitue aussi un risque zoonotique majeur (Budke *et al.*, 2005a ; Wang *et al.*, 2005a). La dynamique de transmission du parasite chez le chien a été modélisée avec succès pour la première fois en utilisant les résultats de purgation à l'arécoline et la structure d'âge des populations canines (Budke *et al.*, 2005b) ;
- des réservoirs d'hôtes intermédiaires potentiels sont présents au Sichuan (Est du plateau tibétain) et dans les provinces voisines du Gansu et du Ningxia. Il s'agit de

campagnols et de lagomorphes. Pour la première fois, ces communautés ont fait l'objet d'un échantillonnage standard, et des estimations de densités relatives effectuées parmi une grande variété de paysages dont les semi-déserts, les zones d'altitude déforestées, les zones d'agriculture intensive et les prairies des hauts plateaux (Danson *et al.*, 2003, Xiao *et al.*, 2004, Raoul *et al.*, 2005) ;

– les méthodes de gestion du bétail et des pâtures et un certain nombre d'indicateurs socio-économiques sont des facteurs de risque : la mise en place d'enclosures privées sur les pâturages d'hiver des troupeaux de yaks ont pour conséquence un surpâturage intense des zones communales, et augmente ainsi l'importance des habitats favorables aux hôtes intermédiaires du parasite (Raoul *et al.*, 2005 ; Wang *et al.*, 2005a ; Wang *et al.*, 2005b). Ce mécanisme semble influencer de façon marquée sur la densité relative locale des petits mammifères et la nature des assemblages et donc le risque potentiel de transmission d' *E. multilocularis* (Danson *et al.*, 2003 ; Danson *et al.*, 2004 ; Graham *et al.*, 2004) ;

– un modèle paysager du risque a été développé : des études comparatives dans des zones déforestées de basse altitude à 300 km du plateau tibétain ont montré une corrélation positive claire entre les paramètres paysagers et la prévalence de l'échinocoque alvéolaire dans les villages. Des modèles prédictifs basés sur des données satellitaires ont été développés (Giraudoux *et al.* ; 2002, Danson *et al.*, 2003 ; Giraudoux *et al.*, 2003 ; Danson *et al.*, 2004 ; Graham *et al.*, 2004) et utilisés pour identifier les zones à risque dans les zones endémiques voisines (Pleydell *et al.*, 2004). Cette approche et les modèles mis au point servent de base à des études, coordonnées par notre équipe, dans le cadre du programme européen Echinorisk (5^e PCRD, 2002-2004), sur l'épidémiologie spatiale et temporelle de l'infection vulpine dans dix pays européens ;

– l'analyse génétique de l'ADN mitochondrial et nucléaire du parasite *E. multilocularis* a montré plus de variations qu'attendu entre les isolats de Chine, d'Amérique du Nord et d'autres régions. (Bart *et al.*, 2005 ; Li *et al.*, 2005). Une nouvelle espèce d'*Echinococcus* a aussi été identifiée à partir du renard tibétain (*Vulpes ferrilata*) et du Pika du plateau (*Ochotona curzoniae*). Nous posons l'hypothèse que cette nouvelle espèce, *E. shiquicus*, a évolué à partir d'un cycle qui se déroule, à travers la relation proies-prédateurs, uniquement sur le plateau tibétain (Li *et al.*, 2005). La susceptibilité des chiens à cette espèce et son potentiel pathogénique pour l'homme demeurent inconnus à ce jour. Par ailleurs plusieurs nouvelles espèces de nématodes ont été décrites dans le Gansu à partir du matériel récolté (Elias *et al.*, 2002).

PLACE DE CE TYPE D'APPROCHE DANS LE CONTEXTE FRANÇAIS¹

Il n'appartient pas aux auteurs de juger de la productivité scientifique de ce type de programme, ni même de sa pertinence, dans la mesure où leur engagement sur le long terme est un aveu de leur passion pour ce type d'approche et d'un risque de

1. Cette section n'engage que les deux auteurs français de cet article.

jugement subjectif. Nous pouvons toutefois apporter quelques éléments de réflexion sur les conditions permettant sa réalisation.

La première difficulté à surmonter, à notre sens, est celui de la reformulation dans chaque discipline d'objectifs et de méthodes qui ne sont pas principalement guidés par les courants majeurs et les modes disciplinaires du moment, mais par la nécessité de répondre à un objectif de recherche commun formulé différemment. De ce fait, en règle générale, et pour les disciplines moins proches de la pratique que celles des sciences médicales et vétérinaires, seules les synthèses pluridisciplinaires sont valorisables dans des revues à impact élevé, après avoir capitalisé pendant plusieurs années, voire dizaines d'années, des résultats intermédiaires jugés d'intérêt modéré (et c'est un euphémisme) par les grandes revues de la discipline. Pour le chercheur en écologie, assez typique de la situation, la prise de risque est donc importante puisque ces années essentielles à la récolte de données et à l'identification de *patterns*, n'amènent pas à produire autre chose que des résultats d'écologie descriptive la plupart du temps difficilement publiables. Il peut donc être lourdement sanctionné, et ses jeunes collaborateurs encore plus que lui, par une évaluation « classique » s'il ne se débrouille pas parallèlement pour pallier ce risque en jouant sur plusieurs tableaux, donc avec un surcroît de travail ou/et un manque à gagner qui peut être considérable. En effet le jugement porté par des pairs sur la qualité du travail à l'intérieur de la discipline, la dimension « pluridisciplinaire » et ses contraintes spécifiques ne sont jamais évaluées *per se*, et encore moins avec des outils adéquats : en fait, le chercheur est toujours plus ou moins suspect de trahison des concepts ou, pour le moins, d'être le *sherpa* d'autres disciplines.

Seconde difficulté : les structures et les modes d'évaluation cloisonnées du système national français sont, de ce point de vue, un frein majeur au développement d'approches pluridisciplinaires. Bien que les différentes institutions de recherche et d'enseignement supérieur déclarent vouloir encourager l'intégration pluridisciplinaire, l'évaluation du chercheur, des unités et des programmes se fait respectivement par des CNU, sections, directions scientifiques, etc. dont les référentiels, la culture et les modes d'évaluation sont fondamentalement et profondément disciplinaires. La masse des budgets de recherche nationaux circule d'ailleurs sur des critères organisés de la même manière que l'évaluation des personnes et des équipes, en grands champs disciplinaires (avec les guerres de défense de position des disciplines, sous-disciplines et écoles, chacune cherchant à assurer son existence ou sa survie). Dans le cas d'appels d'offre affichés explicitement « pluridisciplinaires », il est stupéfiant de voire certaines disciplines, pourtant bien constituées par un corpus de concepts et de méthodes, forcer leur fractionnement en nuances d'écoles ou/et pointer les instruments utilisés, pour arguer de leur caractère pluridisciplinaire (le fait de taper ce texte sur un ordinateur, c'est-à-dire un produit des sciences de l'information, fait-il de ma démarche de biologiste une démarche pluridisciplinaire ?). Il est encore plus stupéfiant de constater que la stratégie est souvent payante. Il est vrai que placer une ligne de démarcation entre une approche pluridisciplinaire et une autre qui ne le serait pas est aussi affaire de critères subjectifs. Sommes nous si sûrs, nous-mêmes, d'être réellement « pluridisciplinaires » dans le programme pré-

144
 senté ici ? La compartimentation française en disciplines puissamment structurées dans l'institution conduit à ce que les ressources importantes nécessaires à la mise en œuvre de programmes pluridisciplinaires ambitieux doivent être cherchées par les équipes à l'international : Union européenne et États-Unis dans le cas présent. La philosophie d'évaluation est alors différente : les objectifs sont exprimés en fonction de besoins thématiques larges et on regarde d'abord la cohérence entre objectifs et moyens mis en œuvre, la compétence des équipes et des individus à traiter le projet à partir du contenu de leurs publications et coopérations antérieures. La nature des disciplines n'est examinée qu'en ce qu'elles servent les objectifs annoncés et les problèmes d'« existence et de survie disciplinaire », s'ils se posent, se posent de façon moins directe et évidente. Ce type d'approche est aussi retenu peu ou prou quand le programme est guidé et interrogé par la finalisation d'une demande spécifique d'acteurs non conventionnels de la recherche, utilisateurs de résultats. On peut même remarquer que dans ce cas, le mot « pluridisciplinaire » n'est souvent même pas prononcé ni écrit, mais éventuellement constaté a posteriori, les disciplines s'organisant spontanément en étant appelées pour ce que leur concours contribue à la résolution du problème posé !

Troisième difficulté : les universités sont organisées en Unités de formation et de recherche (UFR) sur un mode la plupart du temps disciplinaire, quand ce n'est pas les universités elles-mêmes dans les grands bassins de formation, et c'est le cas aussi des autres établissements publics où se fait la recherche. Cette géométrie peut être une force dès lors qu'il s'agit de regrouper des moyens intellectuels dans un champ spécialisé plus ou moins large, mais cela peut devenir un handicap si la « spécialité » visée est justement l'intégration pluridisciplinaire, pour laquelle, à notre connaissance, la notion d'excellence (ou de pôle d'excellence) n'est pas appliquée, sauf pour les grands programmes technologiques (on se retrouve alors, comme mentionné plus haut, dans une situation où les disciplines servent un objectif aval qui les traversent). Le problème se pose d'ailleurs moins au niveau des réseaux de recherche eux-mêmes, qui s'organisent « spontanément », à l'international ou au plan européen, qu'au niveau de la mise en place de formations. Même si une volonté forte se manifeste de la part des équipes pédagogiques, les résistances administratives à l'accompagnement et la gestion de projets trans-UFR dans une université sont souvent rédhibitoires s'ils ne procèdent pas d'une volonté politique forte des présidents et de l'acceptation effective de cette volonté par les directeurs d'UFR. Cette situation est souvent critique dans la mise en place et le portage de cursus d'enseignement supérieur préparant aux approches pluridisciplinaires, ou nécessitant des enseignements partagés, par exemple entre sciences biologiques et géologiques, sciences humaines et sciences médicales. La culture de mobilisation et d'adaptation fluide des structures au service du projet n'est que rarement obtenue, le quotidien étant le plus souvent dans la réalité inverse.

Quatrième difficulté : la culture de la compétition est un frein majeur à l'établissement de réseaux nationaux et internationaux efficaces. Outre qu'elle amène également à des replis disciplinaires (la compétition est plus facile et claire à gérer dans la spécialisation) elle empêche l'articulation sans arrière pensée des équipes et des per-

sonnes. Le réseau international responsable du programme décrit plus haut inclut des unités de recherche de six pays, en équilibre dynamique par recombinaison successive en fonction des objectifs autour d'un noyau consensuel animé par des individus qui partagent le goût d'un travail commun. Il fonctionne depuis plus de quinze ans par la recherche systématique et décomplexée des synergies et des complémentarités des unités de recherche et des personnes, et non dans une logique de compétition avec qui que ce soit si ce n'est soi-même, pour dépasser ses propres limites.

Cinquième difficulté : le portage de projets internationaux et d'un réseau fonctionnel à qui l'on demande, plus encore que dans d'autres domaines, d'inventer son mode de fonctionnement, demande du temps et de la fluidité adaptative. Les enseignants-chercheurs français sont les moins bien lotis dans le groupe. À 192 heures d'équivalent TD statutaires d'enseignement, parfois plus pour que la « boutique » puisse tourner, menés avec des implications lourdes dans la gestion quotidienne de ces enseignements et des filières, à la « triple » mission des hospitalo-universitaires (dont seule celle de « soins » est correctement prise au sérieux par les instances qui décident des postes statutaires susceptibles par ailleurs de donner des moyens humains à la recherche...), auxquelles s'ajoute un nombre insuffisant d'ingénieurs dans les unités de recherche, et la nécessité hurlante, au sein des institutions, d'une formation adaptée des personnels à la spécificité des missions administratives et techniques de soutien à la recherche et à l'enseignement supérieur, répondent par exemple 130 heures de présentiel en enseignement pour nos collègues britanniques et la possibilité de négocier annuellement les charges d'enseignement (et éventuellement de soins pour les médecins), d'administration et de recherche en prenant en compte de façon sérieuse la réalité temporelle et la faisabilité de chacune des missions assurées. Il n'est donc pas étonnant que le portage administratif de programme et sa coordination soient souvent préférentiellement externalisés dans un autre pays de l'Union européenne que la France, par ceux-là même qui pourraient les mettre en œuvre. Cerise sur le gâteau, le système comptable européen et français fondé sur un contrôle *a priori* et suspicieux de dépenses (plutôt qu'*a posteriori* sur justification des résultats scientifiques) alourdit considérablement les procédures et la gestion. Par la mobilisation spécifique des responsables scientifiques qu'il occasionne sur des activités qui, à ce degré, devraient être du ressort d'une administration adaptée et formée à la gestion de programmes internationaux, il cause de fait un manque à gagner important en terme de temps de recherche et d'animation de la recherche. Cette situation n'est pas spécifique des programmes pluridisciplinaires, mais fait toutefois partie d'un paysage qui en freine la réalisation par distraction épuisante et frustrante d'une énergie qui pourrait, de façon plus rentable pour le contribuable, être orientée efficacement vers la mission primaire des chercheurs et enseignants chercheurs : l'innovation et la performance scientifique. À nouveau, cette culture d'adaptation fluide des structures au service d'un projet, si nécessaire à l'activité de recherche, n'est que rarement obtenue globalement dans un établissement, le quotidien étant le plus souvent dans la réalité inverse, le système ne fonctionnant que sur la base de la bonne volonté individuelle d'un nombre limité de

personnes, d'autant plus méritantes, dans les services. Nous ne pouvons pas approfondir ici l'analyse de cet état des lieux, mais les causes en sont très largement connues.

CONCLUSION

Il nous semble que l'interdisciplinarité ne se décrète pas, ni de l'extérieur, ni de l'intérieur d'un projet, et n'est en général pas en soi un objectif pertinent (sauf à être elle-même un objet de recherche sociologique ou épistémologique). Le programme est déterminé *a priori* par la question que l'on cherche à résoudre. Que cette résolution fasse concourir plusieurs disciplines à des objectifs convergents se constate plutôt *a posteriori*, tant il est vrai que nous n'avons pas trouvé de théorie globale permettant de penser en amont l'interdisciplinarité *per se*. Cette convergence vers un objectif ultime commun, dans notre cas au moins, résulte plutôt d'une vision volontairement holistique et systémique d'un problème à résoudre et d'une recherche pragmatique de tout moyen conceptuel ou technique contribuant à cette résolution. Que ces moyens soient du ressort de tel ou tel champ de disciplines n'a finalement pas d'importance. Pour reprendre un vieux dicton promu par Deng Xiaoping : « peu importe que le chat soit noir ou blanc, pourvu qu'il attrape des souris... »

146

Remerciements

Ces travaux impliquent de nombreux collaborateurs et partenaires, parmi ceux-ci : Dr. Francis Raoul, Dr. David Pleydell, Prof. Solange Bresson-Hadni, Dr. Brigitte Bartholomot, M. Dominique Rieffel (University of Franche-Comté, F), Dr. Pierre Delattre, M. Jean-Pierre Quéré (INRA, F), Prof. Mark Danson, Dr. Alastair Graham, Dr. Maiza Campos-Ponce, (University of Salford, UK), Prof. Qiu Jiamin, Dr. Yang Wen, Dr. Wang Qian (Sichuan Institute of Parasitic Diseases, RPC), Prof. Shi Dazhong (Lanzhou Medical College, RPC), Prof. Wang Xiaoming (East China Normal University, RPC), Prof. Wang YunHai, Prof. Wen Hao (Xinjiang Medical University, RPC), Prof. Akira Ito (Asahikawa Medical University, J), Dr. Kenichi Takahashi (Hokkaido Institute of Public Health, J), Dr. Paul Torgerson, Dr. Christine Budke (Institute of Parasitology, Zurich, CH), Pr. Zhou Hongxia (Guanxi Medical University, RPC). Ils ont reçu le soutien financier de l'Union européenne (STD TS3-CT94-0270), des Instituts nationaux de santé et du Fond national pour la science des États-Unis (IR01TW01565-01), de la région de Franche-Comté, du ministère de l'Environnement et du ministère des Affaires étrangères (Programme de recherches avancées franco-chinois géré par l'Association franco-chinoise pour la recherche scientifique et technique et bourses de thèses).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABRAMSON G. and KENKRE V. M., 2002, Spatiotemporal patterns in the hantavirus infection, *Physical Review*, E 66, 011912-1-5.
- ANGELSTAM M., LINDSTRÖM E. and WIDEN P., 1984, Role of predation in short term population fluctuations of some birds and mammals in Fennoscandia, *Ecologia*, (Berlin) 62, p. 199-208.
- BART J. M., KNAPP J., GOTTSTEIN B., BREYER I., MORGENTHALER P. and PIARROUX R., 2005, Characterisation of an original microsatellite marker, EmsB, for investigating the genetic diversity and ecology of *Echinococcus multilocularis*, *Infection, Genetics and Evolution*, submitted.

- BRESSON-HADNI S., LAPLANTE J. J., LENYS D., ROHMER P., GOTTSTEIN B., JACQUIER P., MERCET P., MEYER J. P., MIGUET J. P. and VUITTON D. A., 1994, Seroepidemiological screening of *Echinococcus multilocularis* infection in a European area endemic for *Alveolar echinococcosis*, *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 51, p. 837-846.
- BUDKE C. M., CAMPOS-PONCE M., WANG Q. and TORGERSON P. R., 2005a, A canine purgation study and risk factor analysis for *echinococcosis* in a high endemic region of the Tibetan plateau, *Veterinary Parasitology*, 127, p. 49-55.
- BUDKE C. M., QIU J., CRAIG P. S. and TORGERSON P. R., 2005b, Modelling the transmission of *Echinococcus granulosus* and *Echinococcus multilocularis* in dogs for a high endemic region of the Tibetan plateau, *International Journal for Parasitology*, 35, p. 163-170.
- BUDKE C. M., QIU J., ZINSSTAG J., WANG Q. and TORGERSON P. R., 2004, Use of disability adjusted life years in estimation of the disease burden of *echinococcosis* for a high endemic region of the Tibetan Plateau, *American journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 71, p. 56-64.
- CHEN J. C., YAO Z. Y. and LIAO C. H., 1982, Report on the damage caused by rodent pest in the grassland of South Gansu, China, *Chinese Journal of Zoology*, 3, p. 25.
- CLEAVELAND S., LAURENSEN M. K. and TAYLOR L. H., 2001, Diseases of humans and their domestic mammals: pathogen characteristics, host range and the risk of emergence, *Philosophical Transactions of the Royal Society London*, B 356, p. 991-999.
- COURANT F., BRUNET-LECOMTE P., VOLOBOUEF V., CHALINE J., QUÉRÉ J. P., NADACHOWSKI A., MONTUIRE S., BAO G., VIRIOT L., RAUSCH R., ERBAJEVA M., SHI D. and GIRAUDOUX P., 1999, Identification of *Microtus limnophilus* in a large focus of *Alveolar Echinococcosis* (South Gansu, China), *C. R. Acad. Sc.*, III 322, p. 473-480.
- CRAIG P. S., ALLAN J. C. AND ROGAN M. T., 1996, Detection, screening and community epidemiology of taeniid cestode zoonosis: *cystic echinococcosis*, *alveolar echinococcosis* and *cysticercosis*, *Advances in Parasitology*, 38, p. 169-250.
- CRAIG P. S., GIRAUDOUX P., TORGERSON P. R., ITO A., DANSON F. M., YANG W. and WEN H., 2005, *Ecosystem disturbance and multiscale transmission of a zoonotic wildlife pathogen*, National Institutes of Health & National Science Foundation.
- CRAIG P. S., DESHAN L., MACPHERSON C. N. L., DAZHONG S., REYNOLDS D., BARNISH G., GOTTSTEIN B. and ZHIRONG W., 1992, A large focus of *alveolar echinococcosis* in central China, *The Lancet*, 340, p. 826-831.
- CRAIG P. S., GIRAUDOUX P., SHI D., BARTHOLOMOT B., BARNISH G., DELATTRE P., QUÉRÉ J. P., HARRAGA S., BAO G., WANG Y. H., LU F., ITO A. and VUITTON D. A., 2000, An epidemiological and ecological study of human *alveolar echinococcosis* transmission in south Gansu, China, *Acta tropica*, 77, p. 167-177.
- DANSON F. M., CRAIG P. S., MAN W., SHI D. and GIRAUDOUX P., 2004, Landscape dynamics and risk modeling of human *alveolar echinococcosis*, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70, p. 359-366.
- DANSON F. M., GRAHAM A. J., PLEYDELL D. R. J., CAMPOS-PONCE M., GIRAUDOUX P. and CRAIG P. S., 2003, Multi-scale spatial analysis of human *alveolar echinococcosis* risk in China, *Parasitology*, 127, p. 133-141.
- DAZAK P., CUNNINGHAM A. C. and HYATT A., 2000, Emerging infectious diseases of wildlife-threats to biodiversity and human health, *Science*, 287, p. 443-449.
- DELATTRE P., PASCAL M. and DAMANGE J. P., 1985, Vers une stratégie d'étude épidémiologique de l'*Echinococcosis* alvéolaire. À propos de cas d'infestation observés chez *Microtus arvalis* P. dans le Doubs (France), *Annales de Parasitologie Humaine et Comparée*, 60, p. 389-403.
- DELATTRE P., GIRAUDOUX P., DAMANGE J. P. and QUERE J. P., 1990, Recherche d'un indicateur de la cinétique démographique des populations du Campagnol des champs (*Microtus arvalis*), *Revue d'Écologie (Terre Vie)*, 45, p. 375-384.

- DELATTRE P., PASCAL M., LE PESTEUR M. H., GIRAUDOUX P. and DAMANGE J. P., 1988, Caractéristiques écologiques et épidémiologiques de l'*Echinococcus multilocularis* au cours d'un cycle complet des populations d'un hôte intermédiaire (*Microtus arvalis*), *Canadian Journal of Zoology*, 66, p. 2740-2750.
- DELATTRE P., GIRAUDOUX P., BAUDRY J., QUERE J. P. AND FICHET E., 1996, Effect of landscape structure on Common Vole (*Microtus arvalis*) distribution and abundance at several space scales, *Landscape Ecol.*, 11, p. 279-288.
- DELATTRE P., GIRAUDOUX P., BAUDRY J., TRUCHETET D., MUSARD P., TOUSSAINT M., STAHL P., POULE M. L., ARTOIS M., DAMANGE J. P. and QUERE J. P., 1992, Land use patterns and types of common vole (*Microtus arvalis*) population kinetics, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 39, p. 153-169.
- DUHAMEL R., QUÉRÉ J. P., DELATTRE P. and GIRAUDOUX P., 2000, Landscape effects on the population dynamics of the fossorial form of the water vole (*Arvicola terrestris sherman*), *Landscape Ecology*, 15, p. 89-98.
- ELIAS E., BAO G. AND DURETTE-DESSET M. C., 2002, Two new species of *Heligmosomoidae*, 1977 (*Nematoda*, *Trichostrongylina*: *Heligmosomoidae*) from myospalacine rodents in China Gansu, with redefinition of the genus, *Systematic parasitology*, 51, p. 73-80.
- GIRAUDOUX P., 1991, *Utilisation de l'espace par les hôtes du ténia multiloculaire (Echinococcus multilocularis) : conséquences épidémiologiques*, PhD thesis, Université de Bourgogne, 90 p.
- GIRAUDOUX P., DELATTRE P., QUERE J. P. and DAMANGE J. P., 1994, Structure and kinetics of rodent populations in a region under agricultural land abandonment, *Acta Oecologica*, 15, p. 385-400.
- GIRAUDOUX P., PRADIER B., DELATTRE P., DEBLAY S., SALVI D. and DEFAUT R., 1995, Estimation of water vole abundance by using surface indices, *Acta theriologica*, 40, p. 77-96.
- GIRAUDOUX P., DELATTRE P., TAKAHASHI K., RAOUL F., QUÉRÉ J. P., CRAIG P. and VUITTON D., 2002, Transmission ecology of *Echinococcus multilocularis* in wildlife: what can be learned from comparative studies and multi-scale approaches? in CRAIG P. AND PAWLOWSKI Z. (eds), *Cestode Zoonoses: echinococcosis and cysticercosis. An emergent and global problem*, IOS Press, Amsterdam, p. 267-285.
- GIRAUDOUX P., QUERE J. P., DELATTRE P., BAO G., WANG X., SHI D., VUITTON D. AND CRAIG P. S., 1998, Distribution of small mammals along a deforestation gradient in south Gansu, China, *Acta Theriologica*, 43, p. 349-362.
- GIRAUDOUX P., RAOUL F., BARDONNET K., VUILLAUME P., TOURNEUX F., CLIQUET F., DELATTRE P. and VUITTON D., 2001, *Alveolar echinococcosis*: characteristics of a possible emergence and new perspectives in epidemiosurveillance, *Médecine et maladies infectieuses*, 31, p. 247-256.
- GIRAUDOUX P., VUITTON D., BRESSON-HADNI S., CRAIG P., BARTHOLOMOT B., BARNISH G., LAPLANTE J. J., ZHONG S. D., WANG Y. H. and LENYS D., 1996, Mass screening and epidemiology of *Alveolar echinococcosis* in France, Western Europe, and in Gansu, Central China: from epidemiology towards transmission ecology, in ITO J. and SATO N. (eds), *Alveolar echinococcosis: strategy for eradication of alveolar echinococcosis of the liver*, Fuji Shoin, Sapporo 060, Japan, 197-211.
- GIRAUDOUX P., DELATTRE P., HABERT M., QUERE J. P., DEBLAY S., DEFAUT R., DUHAMEL R., MOISSENET M. F., SALVI D. and TRUCHETET D., 1997, Population dynamics of fossorial water vole (*Arvicola terrestris sherman*): a land usage and landscape perspective, *Agriculture Ecosystems and Environment*, 66, p. 47-60.
- GIRAUDOUX P., CRAIG P. S., DELATTRE P., BARTHOLOMOT B., BAO G., BARNISH G., HARRAGA S., QUÉRÉ J. P., RAOUL F., WANG Y. H., SHI D. and VUITTON D., 2003, Interactions between landscape changes and host communities can regulate *Echinococcus multilocularis* transmission, *Parasitology*, 127, p. 121-131.
- GODOT V., HARRAGA S., BEURTON I., TIBERGHEN P., SARCIRON E., GOTTSTEIN B. and VUITTON D. A., 2000, Resistance/susceptibility to *Echinococcus multilocularis* infection and cytokine profile in humans. II. Influence of the HLA B8, DR3, DQ2 haplotype, *Clinical Experimental Immunology*, 121, p. 491-498.

- GRAHAM A., DANSON F., GIRAUDOUX P. and CRAIG P., 2004, Ecological epidemiology: landscape metrics and human *alveolar echinococcosis*, *Acta Tropica*, 91, p. 267-278.
- HANSSON L., 1990, Mineral selection in microtine populations, *Oikos*, 59, p. 213-224.
- HANSSON L., 1995, Is the indirect predator effect a special case of generalized reactions to density-related disturbances in cyclic rodent populations? *Ann Zool Fenn*, 32, p. 159-162.
- HANSSON L., 2002, Rodent dynamics, population regulation and predation in changeable landscapes: importance for *Echinococcus* transmission, in CRAIG P. S. and PAWLOWSKI Z. (eds), *Cestode Zoonoses: echinococcosis and cysticercosis. An emergent and global problem*, Amsterdam, IOS Press, p. 267-285.
- HOUGHTON R. A. and HACKLER J. L., 2003, Sources and sinks of carbon from the land-use change in China, *Global Biogeochemical Cycles*, 17, 1034 (3-1_3-19).
- HSIA W. P., 1958, On the changing tendencies of the rodent population in the recent cut-over land at Dailing, Northeast China, *Acta Zoologica Sinica*, 10, p. 431-437.
- HSIA W. P. and CHU S. K., 1963, A supplementary study on the changing tendencies of the rodent population in the recent cut-over land at Dailing, Northeastern China, *Acta Zoologica sinica*, 15, p. 538-543.
- KITTREDGE D. B. J., 1996, Changes in global forest distribution, in DEGRAAF R. M. and MILLER R. I. (eds), *Conservation of faunal diversity in forested landscape*, London, Chapman & Hall, p. 37-60.
- LI T., QIU J., YANG W., CRAIG P. S., CHEN X., XIAO N., ITO A., MUMUTI W., YU W. and SCHANTZ P. M., 2005, *Echinococcosis* in Tibetan populations, Western Sichuan Province, China: a unique and unusually severe public health problem? *Emerging Infectious Diseases*, décembre.
- LIDICKER W. Z., 1985, Population structuring as a factor in understanding microtine cycles, *Acta Zool. Fennica*, 173, p. 23-27.
- LIDICKER W. Z., 2000, A food web/landscape interaction model for Microtine density cycles, *Oikos*, 91, p. 432-445.
- LIDICKER W. Z. J., 1991, In defense of a multifactor perspective in population ecology, *J. Mamm.*, 72, p. 631-635.
- LIDICKER W. Z. J. (eds), 1995, *Landscape approaches in mammalian ecology and conservation*, University of Minnesota Press, Minneapolis, 215 p.
- LUCIUS R. and BILGER B., 1995, *Echinococcus multilocularis* in Germany: Increased Awareness or Spreading of a Parasite? *Parasitology Today*, 11, p. 430-434.
- MALYGIN V. M., ORLOV V. N. and YATSENKO V. N., 1990, Species independence of *Microtus limnophilus*, its relations with *M. oeconomus* and distribution of these species in Mongolia, *Zool. Zhurnal*, 69, p. 115-127.
- MORENS D. M., FOLKERS G. K. and FAUCI A., 2004, The challenge of emerging and re-emerging infectious diseases, *Nature*, 430, p. 242-249.
- PATZ J. P., DAZAK P., TABOR G. M., AGUIRRE A. A., PEARL M., EPSTEIN J., WOLFE N. D., KILPATRICK A. M., FOUFPOLOUS J., MOLYNEUX D., BRADLEY D. J. and EMERGENCE M. O. T. W. G. O. L. U. C. A. D., 2004, Unhealthy landscapes: Policy recommendations on land use change and infectious disease emergence, *Environmental Health Perspectives*, 112, p. 1092-1098.
- PAWLOWSKI E. N., 1964, Natural foci of transmissible diseases in connexion with the landscape epidemiology of zoonanthroponosis, *Naouka*, Moscou-Leningrad, p. 1-211.
- PESSON B. and CARBIENER R., 1989, Écologie de l'échinococcose alvéolaire en Alsace : le parasitisme du Renard roux (*Vulpes vulpes* L.), *Bulletin d'écologie*, 20, p. 295-301.
- PLEYDELL D. R. J., RAOUL F., DANSON F. M., GRAHAM A., CRAIG P. S., TOURNEUX F. and GIRAUDOUX P., 2004, Modelling the spatial distribution of *Echinococcus multilocularis* infection in foxes, *Acta Tropica*, 91, p. 253-265.

- RAOUL F., QUERE J.-P., RIEFFEL D., BERNARD N., TAKAHASHI K., SCHEIFLER R., WANG Q., QIU J., YANG W., CRAIG P. S., ITO A. and GIRAUDOUX P., 2005, Distribution of small mammals along a grazing gradient on the Tibetan plateau of western Sichuan, China, *Mammalia*, in press.
- RAUSCH R. L., 1995, Life-cycle patterns and geographic distribution of *Echinococcus species*, in THOMSON R. C. A. and LYMBERY A. J. (eds), *Echinococcus and hydatid disease*, CAB International, Wallingford - Oxon, p. 89-134.
- RIOUX J. A., DEREURE J. and PERIÈRES J., 1990, Approche écologique du « risque épidémiologique ». L'exemple des leishmanioses, *Bulletin d'écologie*, 21, p. 1-9.
- SAKAMOTO T., ISHII A. and KOBAYASHI C., 1996, Long term observation on the change of growth and pathogenicity of *Echinococcus multilocularis* by serial passages in Mongolian gerbils, in ITO J. AND SATO N. (eds), *Alveolar echinococcosis: strategy for eradication of alveolar echinococcosis of the liver, Fuji Shoin*, Sapporo 060, Japan, p. 89-93.
- SCHANTZ P., CHAI J., CRAIG P. S., ECKERT J., JENKINS D. J., MACPHERSON C. N. L. and THAKUR A., 1995, Epidemiology and control of hydatid disease, in THOMSON R. C. A. and LYMBERY A. J. (eds), *Echinococcus and hydatid disease*, CAB International, Wallingford - Oxon, 477 p.
- TACKMANN K., LÖSCHNER U., MIX H., STAUBACH C., THULKE H.-H. and CONRATH F. J., 1998, Spatial distribution patterns of *Echinococcus multilocularis* (Leuckart 1863) (Cestoda: Cyclophyllidae: Taeniidae) among red foxes in an endemic focus in Brandenburg, Germany, *Epidemiol. Infect.*, 120, p. 101-109.
- VEIT P., BILGER B., SCHAD V., SCHÄFER, FRANK W. and LUCIUS R., 1995, Influence of environmental factors on the infectivity of *Echinococcus multilocularis* eggs, *Parasitology*, 110, p. 79-86.
- VIEL J. F., GIRAUDOUX P., ABRIAL V. and BRESSON-HADNI S., 1999, Water vole (*Arvicola terrestris scherman*) density as risk factor for human *alveolar echinococcosis*, *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 61, p. 559-565.
- VUITTON D., BRESSON-HADNI S., LIANCE M., MEYER J. P., GIRAUDOUX P. and LENYS D., 1990, L'échinococcose alvéolaire humaine : hasard épidémiologique ou fatalité immunologique ? *Gastroentérologie clinique et biologique*, 14, p. 124-130.
- VUITTON D. A., ZHOU H. X., BRESSON-HADNI S., QIANG W., RAOUL F. and GIRAUDOUX P., 2003, Epidemiology of *alveolar echinococcosis* in humans: an update of the situation in Europe and China and new epidemiological trends, *Parasitology*, 127, p. 87-107.
- WANG Q., QIU J., YANG W., SCHANTZ P. M., RAOUL F., CRAIG P. S., GIRAUDOUX P. and VUITTON D. A., 2005a, Socio-economical and behavioral risk factors of human *alveolar echinococcosis* in Tibetan communities, Sichuan, China, *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, in press.
- WANG Q., VUITTON D., QIU J., GIRAUDOUX P., XIAO Y., SCHANTZ P., RAOUL F., LI T., WEN Y. and CRAIG P. S., 2005b, Fenced pasture: a possible risk factor for human *alveolar echinococcosis* in Tibetan pastoralist communities of Sichuan, China, *Acta tropica*, 90, p. 285-93.
- WEBER J. M. and AUBRY S., 1993, Predation by foxes, *Vulpes vulpes*, on the fossorial form of the water vole, *Arvicola terrestris scherman*, in western Switzerland, *Journal of Zoology*, London, 229, p. 553-559.
- XIAO N., LI T., QIU J., NAKAO M., CHEN X., NAKAYA K., YAMASAKI H., SCHANTZ P. M., CRAIG P. S. and ITO A., 2004, The tibetan hare *Lepus oiostolus*: a novel intermediate host for *Echinococcus multilocularis*, *Parasitology Research*, 92, p. 352-3.
- ZHANG S., PENFORNIS A., HARRAGA S., CHABOD J., BEURTON I., BRESSON-HADNI S., TIBERGHIE P., KERN P. and VUITTON D. A., 2003, Polymorphisms of the TAP1 and TAP2 genes in human *alveolar echinococcosis*, *European Journal of Immunogenetics*, 30, p. 63-9.
- ZHOU H. X., WEN H., WANG Y. H., DELATTRE P., QUERE J. P., VUITTON D. A., CRAIG P. and GIRAUDOUX P., 1998, Experimental susceptibility of *Spermophilus erythrognus* to *Echinococcus multilocularis*, *Annals of Tropical Medicine and Parasitology*, 93, p. 335-337.

Chapitre 13

La conservation et la gestion de la biodiversité : un défi pour l'interdisciplinarité*

151

INTRODUCTION

Conserver ou gérer la biodiversité est devenu un leitmotiv : la Convention sur la diversité biologique, issue du Sommet planétaire de Rio en 1992 et ratifiée par la quasi-totalité des États de la planète, est là pour nous le rappeler. Cet objectif, qui ne manquera pas de figurer dans les stratégies nationales de développement durable que sont en train de préparer ou dont sont en train de se doter de nombreux pays depuis le Sommet planétaire de Johannesburg (2002), est, par définition, interdisciplinaire. Reste à relever le défi.

C'est ce qu'a tenté, notamment aux États-Unis, un groupe de chercheurs à l'origine de ce que l'on appelle aujourd'hui, assez improprement, la biologie de la conservation.

Mon propos ne sera cependant pas de reprendre l'histoire des idées en matière de conservation de la Nature ; ni de développer un cours sur ce qu'est ou n'est pas la biologie de la conservation. Dans l'esprit de ce livre, j'ai souhaité partager une série d'interrogations ou de réflexions de l'ordre de la politique scientifique autant que de l'engagement personnel sur les difficultés et les enjeux de la conservation ou de la gestion de la biodiversité du point de vue de l'écologiste.

Si l'objectif ultime de la biologie de la conservation est bien la conservation et la gestion durables de la biodiversité il est clair que cela demande à la fois des approches intégrées et un regard éclairé par les sciences humaines – donc l'émergence d'une culture véritablement interdisciplinaire.

C'est, assurément, un défi difficile pour l'écologie et les sciences de la biodiversité parce que nous sommes responsables de la crise d'extinction actuelle, que Leakey et Lewin (1997) appellent la sixième extinction (Teyssède, 2005), parce que notre planète est encore mal connue de ce point de vue là et enfin parce qu'il nous faut apporter non seulement des théories et des principes mais aussi et surtout une science efficace, relayée par des instruments ou des arguments d'aide à la décision, en vue d'une utilisation pratique pour des gestionnaires, des collectivités territoriales ou en appui à des politiques publiques.

* Chapitre rédigé par Robert BARBAULT

Mais un défi qu'il leur faut pourtant impérativement relever. Les sciences écologiques – hormis l'agriculture – ne sont ni accoutumées à cela, ni préparées à le faire.

Un défi qui comprend deux facettes et que j'énoncerai par deux questions : l'évidente interdisciplinarité qu'il y a nécessité de mettre en œuvre n'est-elle pas paralysée par la montée en puissance de la biologie de la conservation ? L'appel à l'action, que revendique cette biologie de la conservation, n'ajoute-t-il pas un obstacle à la cristallisation d'une interdisciplinarité effective ?

Je construirai l'exposé autour des quatre thèmes suivants : la biodiversité, un champ de recherche renouvelé ; conserver et gérer la biodiversité : les obstacles et les enjeux ; les dimensions de l'interdisciplinarité que cela exige ; les renouvellements scientifiques attendus.

LE CHAMP DE LA BIODIVERSITÉ

Le champ de la biodiversité ne se réduit pas à celui que désigne l'expression « diversité du vivant » et ne le recouvre pas non plus en totalité. Du moins, c'est le point de vue que je souhaite ici défendre.

Peu après Rio, excédés par la médiatisation faite autour du néologisme de « biodiversité » qui y apparut et, peut-être, par l'intérêt que commençait à susciter l'initiative de quelques-uns à porter un programme national « Dynamique de la biodiversité et environnement », une grande majorité de biologistes raillaient volontiers cette « ferveur » par un méprisant « étudier la biodiversité, c'est ce que l'on a toujours fait ! ».

On peut en effet réduire ce néologisme de biodiversité, forgé en 1987 et popularisé un peu plus tard par Edward O. Wilson (1988), à sa définition première de « diversité du vivant ». Mais je pense que c'est un peu court : quelque chose s'est passé, qui change le regard que portaient depuis longtemps biologistes, systématiciens, généticiens ou écologues sur la diversité du vivant. Comme je l'ai déjà dit par ailleurs (Barbault, 1993), on peut défendre l'idée que le vocable « biodiversité » signe l'émergence d'un nouveau concept « venu au monde » à Rio de Janeiro en juin 1992.

De fait, mondialisé à Rio, conçu dans les affres de la préparation de cette conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement, le mot « biodiversité », à la différence de l'expression « diversité du vivant », est fortement connotée par un souci écologique d'approche intégratrice et également par le contexte « développement durable » qui a marqué cette conférence.

S'il est vrai, en effet, que c'est bien pour parler de « diversité du vivant » que Walter Rosen a forgé le mot *Biodiversity*, c'est dans un esprit sensiblement différent de celui des systématiciens ou paléontologues qui, depuis longtemps, n'ont cessé de s'intéresser à la diversité des espèces vivantes ou fossiles ; différent aussi de celui des généticiens absorbés par l'analyse de la variabilité génétique qui caractérise le génome des êtres vivants ; différent encore du point de vue classique des écologues portés à mesurer, caractériser ou expliquer la richesse spécifique des peuplements animaux ou végétaux ou la diversité des grands types d'écosystèmes.

Bref, ce qui est nouveau ici c'est que l'on s'intéresse simultanément, de manière intégrée, non seulement à la variabilité génétique, à la richesse spécifique ou à la diversité écologique, mais aussi, et surtout, à leurs interactions (*figure 1*).

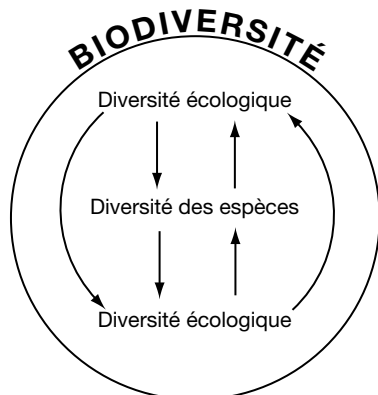


Figure 1. Le concept de biodiversité s'applique à l'ensemble constitué par la diversité génétique, la diversité des espèces et la diversité écologique ainsi qu'à ses interactions (d'après Di Castri et Younès, 1996).

Il n'est pas exagéré de voir là un saut épistémologique significatif, qui concerne il est vrai principalement les biologistes. Encore qu'en plaçant *Homo sapiens* dans cette approche écologique de la dynamique de la diversité du vivant on commence à taquiner plus sérieusement certaines interfaces délicates avec les sciences humaines et sociales (*cf.* les débats sur la sociobiologie).

Cela dit, la rupture majeure à mes yeux, le véritable saut épistémologique décisif qu'accomplit le concept de biodiversité, provient du contexte qui l'a engendré : une Conférence planétaire sur l'environnement et le développement, marquée en coulisse par des conflits d'intérêts, des enjeux de conservation ou d'utilisation, une préoccupation affirmée d'appuyer le développement des sociétés humaines sur un environnement préservé. Bref, un contexte qui fait éclater le cadre « science de la vie » où la diversité du vivant était confinée jusque-là, pour mettre la biodiversité au carrefour des sciences de la nature, des sciences de l'homme et de la société, et des sciences de l'ingénierie et de la décision. Une vraie révolution pour le biologiste !

On est bien là dans un univers conceptuel différent de celui des biologistes, ce qui explique que certains auteurs voient dans le concept de biodiversité une construction sociale (Aubertin, Boisvert et Vivien, 1998).

CONSERVER ET GÉRER LA BIODIVERSITÉ : OBSTACLES ET ENJEUX

En matière de protection de la nature ou de gestion de ses ressources les idées ont beaucoup évolué depuis la création des premiers Parcs nationaux à la fin du XIX^e siècle.

Catherine Larrère (1997), qui s'est penchée sur les philosophies de l'environnement, en donne une excellente synthèse à partir de l'histoire des idées utilitaristes et conservationnistes aux États-Unis.

En complément du regard et de la lecture du philosophe, on peut s'attacher un instant à la présentation que donne Berthie J. Weddell (2002) de la biologie de la conservation dans son récent manuel *Conserving Living Natural Resources*. Les titres qu'elle adopte pour définir la tonalité des trois parties de l'ouvrage sont explicites : 1. « Gérer pour maximiser la production d'espèces particulières – une approche utilitaire de la conservation » ; 2. « Protéger et restaurer les populations et les milieux – une approche préservationniste de la conservation » ; 3. « Gérer pour maintenir processus et structures – une approche 'écosystème-durable' de la conservation ».

Avec ces trois approches, Berthie J. Weddell résume bien les lignes de force qui ont marqué l'histoire des idées dans le domaine – et qui conservent côte à côte leur pleine actualité.

Le point essentiel, qui marque l'émergence de la biologie de la conservation moderne dans la décennie quatre-vingt, réside dans une double rupture épistémologique que souligne clairement Michaël Soulé (2001) en proclamant que la biologie de la conservation serait une réponse de la communauté scientifique à la sixième crise d'extinction : d'une part, la toile de fond théorique et méthodologique de la biologie de la conservation est celle apportée par l'écologie de la seconde moitié du XX^e siècle ; d'autre part, la biologie de la conservation est une science d'action, vouée à la préservation de la biodiversité, à la sauvegarde de son potentiel évolutif et à l'anticipation des catastrophes qui la menacent.

Cette double révolution conceptuelle entraîne de nouvelles prises de conscience, qui débouchent sur l'identification de quatre nécessités complémentaires :

- passer d'approches trop strictement populationnelles à des approches plus largement écologiques, écosystémiques et macro-écologiques – de l'ordre de l'écologie des paysages ;
- se positionner dans le cadre d'une planète fortement anthropisée, directement ou indirectement ;
- s'inscrire, au niveau de la réflexion et de l'action, dans la perspective d'une gestion durable ;
- développer les échanges et partenariats entre chercheurs, gestionnaires et autres utilisateurs de l'espace.

C'est ce que j'appelle ici le défi auquel doivent répondre aujourd'hui l'écologie et ses acteurs, professionnels ou amateurs, chercheurs, militants ou gestionnaires.

De fait, ainsi que le rappellent Mace, Balmford et Ginsberg (2002) dans le chapitre introductif de leur récent ouvrage *Conservation in a changing world*, les biologistes de la conservation ont développé trois approches principales.

La première, baptisée « paradigme des populations déclinantes », a privilégié l'analyse des causes de déclin et les mesures pour y remédier. La seconde, labellisée « paradigme des petites populations » a largement contribué au développement de nos connaissances sur le fonctionnement génétique et démographique des populations à petits effectifs ainsi qu'aux effets qui en résultent. La troisième, qui s'est

développée un peu plus tard, s'est intéressée, en reliant données empiriques et traitements informatiques, à la définition d'aires prioritaires où concentrer les efforts de conservation.

Quel que soit l'intérêt, indiscutable, de ces approches, elles paraissent insuffisantes et limitées ; en particulier, elles pâtissent d'un double « décalage » : d'abord entre l'échelle des mécanismes et processus analysés et celle où s'exercent les menaces qui affectent la biodiversité (et où devrait être posée la stratégie de conservation) ; ensuite, entre les questions abordées et celles auxquelles sont confrontées les gestionnaires.

Sur ce dernier point, rapportons une étude entreprise aux États-Unis qui a consisté à confronter les questions que se posaient 50 gestionnaires de Floride et celles auxquelles tentent de répondre 214 articles publiés dans *Conservation Biology*. Le résultat le plus saillant de cette étude est l'écart entre la préoccupation dominante des gestionnaires, relative aux processus écologiques et évolutifs (38 % des questions contre 13 à 14 % dans la littérature analysée), et la préoccupation dominante des chercheurs, relative au *design* des réserves et aux petites populations (37 % des questions contre 11 à 12 % chez les gestionnaires). Naturellement cet exemple souffre des limites propres aux deux échantillons : des gestionnaires de Floride et la revue *Conservation Biology*. Il serait dangereux de généraliser.

En fait, ces gestionnaires apparaissent très préoccupés par la sauvegarde des interactions écologiques et des processus évolutifs : comment faire lorsque l'on est responsable de réserves de taille modeste ? Et, parallèlement, comment anticiper les effets sur les contenus des aires protégées de phénomènes à la fois naturels et anthropiques survenant ou susceptibles de survenir à des échelles de paysages plus vastes ? Cette préoccupation rejoint la mise en garde de Perrings et Gadgil (2002) : « La conservation de la biodiversité possède une dimension locale et une dimension planétaire. Pour qu'elle soit efficace, il est nécessaire de bien comprendre les liens entre ces deux échelles spatiales ».

Il faut bien reconnaître que les biologistes de la conservation restent là à peu près sans réponse. On voit bien qu'il y a lieu maintenant de se tourner vers des approches plus largement écosystémiques relevant de l'écologie du paysage ou de la macroécologie. Et cela conduit très logiquement, dans l'esprit des attentes des gestionnaires que je viens d'évoquer, à prendre davantage en compte le contexte fortement anthropisé dans lequel nous vivons et où nous tentons d'abstraire des espaces « protégés » – avec les hommes qui y vivent et y ont d'autres intérêts.

Cette exigence de cadrage plus large, à la fois géographiquement et conceptuellement (parler de planète fortement anthropisée c'est appeler le concours d'autres disciplines que l'écologie), qui se prolonge très logiquement aujourd'hui par cette troisième nécessité énoncée au début, à savoir, l'inscription dans une perspective de développement durable – avec ses trois exigences d'efficacité économique, d'équité sociale et de viabilité écologique est d'évidence une exigence d'interdisciplinarité.

UNE INTERDISCIPLINARITÉ À TROIS NIVEAUX

De ce qui vient d'être dit découle très logiquement la forte interdisciplinarité du champ de recherches que définit le concept de biodiversité. Une interdisciplinarité riche et complexe qu'il est commode de décliner en trois niveaux.

Dès le premier volet de la définition qu'en donne la figure 1, on voit s'afficher une forte sollicitation à une interdisciplinarité entre biologistes-systématiciens, généticiens, écologues, physiologistes, éthologistes. Une interdisciplinarité qui va de soi, à laquelle invitent les développements récents de la biologie et de l'écologie – que l'on parle de biologie intégrative ou de dynamique de la biodiversité.

Parler de dynamique de la biodiversité, c'est toutefois aller plus loin encore, réclamer une interdisciplinarité élargie à l'ensemble des sciences de la nature – géodynamique, paléontologie, paléoclimatologie, etc. – et où, dès lors que l'homme moderne, chasseur, agriculteur puis industriel occupe la scène, commence à poindre l'invitation à un nouveau partenariat, cette fois entre sciences de la nature et sciences de l'homme et de la société.

Voilà franchi le troisième niveau d'interdisciplinarité que comporte nécessairement ce nouveau champ de recherches, affiché dans toute sa portée à Rio de Janeiro et inscrit en arrière-fond de la Convention sur la diversité biologique. Convention ratifiée par la très grande majorité des États de la planète – à l'exception notable, toutefois, des États-Unis : ce seul fait démontre bien qu'il ne s'agit plus là seulement de science telle qu'on la conçoit un peu naïvement dans les universités.

Il est clair que c'est cette interdisciplinarité là qui est la plus révolutionnaire, la plus prometteuse, la plus porteuse d'enjeux ; c'est ce que je voudrais illustrer par quelques exemples.

DES RENOUVELLEMENTS SCIENTIFIQUES NÉCESSAIRES

Altération et destruction des milieux, surexploitation de certaines espèces, expansion d'espèces introduites, les acteurs des sciences de la conservation sont confrontés à la nécessité d'apprécier des dynamiques, d'anticiper des évolutions, de corriger des trajectoires et de convaincre de la validité de leurs analyses et propositions d'autres acteurs et utilisateurs de l'espace écologique, qu'il s'agisse des villes ou des campagnes, des terres ou des mers, des sols ou des eaux.

Parce que nous sommes engagés là dans des débats de société, il est impératif de pouvoir s'appuyer sur des dispositifs d'analyse rigoureux. Et, pour cela, le développement des recherches et la mise en place de dispositifs d'inventaires et de suivis à long terme s'imposent comme une double nécessité.

Quelques atouts de départ

Au cours des deux dernières décennies la biologie de la conservation a produit un corps important de théories visant à prédire et compenser les impacts des activités humaines sur les populations animales et végétales, les espèces et les écosystèmes (Possingham *et al.*, 2001).

En fait, la biologie de la conservation moderne repose largement sur les apports théoriques et méthodologiques de l'écologie et de la biologie des populations, qui se sont accumulés tout au long du vingtième siècle et spécialement durant sa seconde moitié.

Je rappellerai seulement deux éléments essentiels de cette culture écologique, qui permet une approche efficace et pertinente des problèmes liés à la conservation de la biodiversité : le concept d'écosystèmes et la théorie de la biogéographie insulaire

À l'entrée du vingtième siècle, un des obstacles épistémologiques majeurs rencontré par les naturalistes fut l'impressionnante et fascinante multiplicité des espèces sauvages, qui présentaient une considérable diversité d'histoires de vie, de formes et de tailles corporelles. Comment se sortir d'une telle vision atomisée de la nature ? Comment rendre compte de tout cela à travers un cadrage scientifique qui le rende intelligible, généralisable ?

Le concept de système écologique a fourni, dans les décennies d'après-guerre, cette approche intégrative et fonctionnelle si attendue par l'écologie en pleine croissance puis, dans une seconde phase, à partir des années quatre-vingt, par la biologie de la conservation.

Il est évident que les gestionnaires et autres praticiens de la conservation de la biodiversité ont besoin d'informations sur le fonctionnement des systèmes écologiques, sur les interactions entre espèces qui déterminent leurs propriétés fonctionnelles, ainsi que sur les échelles spatiales et temporelles auxquelles elles opèrent. Ils ont besoin de savoir, par exemple, quel type et quelle proportion de perturbations les communautés écologiques qui les intéressent peuvent ou doivent absorber ; quelles peuvent être les conséquences sur ces dernières de la fragmentation des écosystèmes ; comment et pourquoi, dans quelle mesure, telle ou telle espèce introduite peut altérer l'ensemble de l'écosystème (Soulé et Orians, 2001).

Dans ce domaine, le développement de l'écologie des peuplements (Barbault, 1992 ; Pimm, 1991), de l'écologie des paysages, comme celui de ce que l'on appelle la « macroécologie » (Brown, 1995), devraient être décisifs. De fait, l'un des changements importants qui s'est produit au sein de la biologie de la conservation au cours des deux dernières décennies a été la prise de conscience croissante de la complexité des interactions qui constituent la trame fonctionnelle de la nature et des échelles et contextes spatiaux et temporels variés auxquelles elles opèrent. Aujourd'hui il y a une attention croissante portée aux rétro-actions complexes qui se produisent à tous les niveaux d'organisation des systèmes biologiques, entre des régions relativement éloignées de la terre, entre des espaces cultivés et des terres « sauvages » ainsi qu'entre les êtres humains et les autres espèces (Soulé et Orians, 2001).

Où, sur l'étendue géographique de l'espace à gérer, l'effort de protection doit-il s'appliquer ? Où et quels milieux faut-il restaurer ? Quelle amplitude faut-il donner aux aires protégées ?

Voilà quelques-unes des questions que se posent les gestionnaires de la nature.

Il existe toute une gamme de théories qui abordent ces questions ou permettent de le faire, à commencer par la théorie de la biogéographie insulaire de MacArthur et Wilson (1967) et jusqu'à, plus récemment, la théorie des métapopulations et son

appendice, la théorie des sources et des puits. Elles ont donné naissance à toute une série de règles utiles, telles que : de grandes réserves sont préférables à des petites ; des réserves connectées entre elles sont plus intéressantes que des réserves isolées ; concentrer les efforts de protection sur les populations sources et ignorer les populations puits, etc.

Toutes les règles de ce type ont été utiles en fournissant des principes de conservation de portée générale. Cependant, certaines d'entre elles restent discutées et leur portée pratique est relativement réduite ou insuffisante pour résoudre la plupart des problèmes spécifiques de conservation ou de gestion.

Se confronter aux contraintes de la gestion

158

Pour un gestionnaire de milieux, le type de question qui se pose est : « Quelle fraction de mon effort de conservation dois-je consacrer à la revégétalisation, à la régulation des prédateurs, au renforcement de populations fragilisées, à la lutte contre les espèces invasives, etc. ? »

Aussi, pour réussir dans leur mission, écologues et biologistes de la conservation doivent faire plus que produire des théories et des principes scientifiques intégrateurs. En particulier, ils doivent quitter le terrain des seules sciences biologiques pour inclure davantage d'économie, davantage de sciences de la gestion, davantage de théorie de la décision (Possingham *et al.*, 2001) – même s'il est clair que l'écologie est centrale, en tant que science d'intégration et manière d'observer et de penser un monde complexe qu'il nous appartient de gérer.

Un monde dans lequel nous sommes dépendant des écosystèmes, à travers les ressources naturelles et les services écologiques qu'ils fournissent et où nous sommes devenus le principal moteur des changements de biodiversité (figure 2).

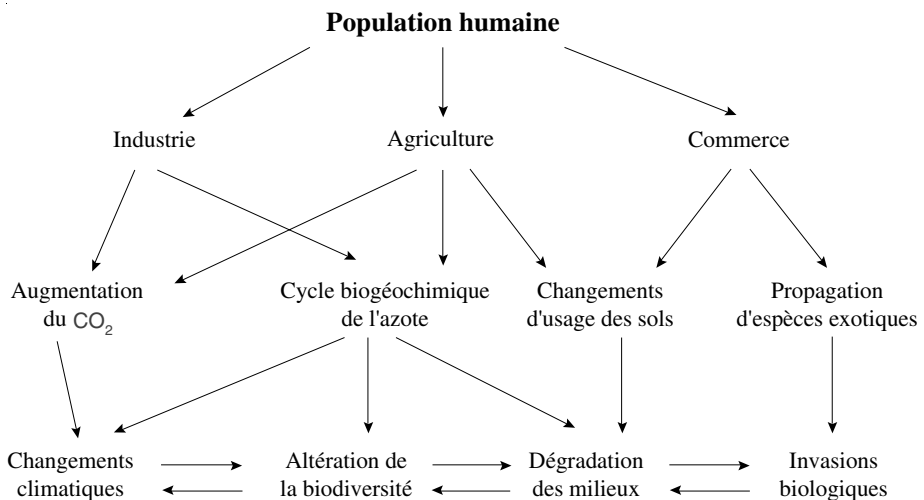


Figure 2. Principaux changements écologiques induits par les activités humaines (d'après Vitousek *et al.* 1997).

Cette figure, adaptée de Vitousek *et al.* (1997), souligne indirectement comment les activités humaines sont en train de changer le monde biophysique. En particulier, elle énonce les principales menaces qui pèsent sur la biodiversité :

- la destruction et la fragmentation des habitats, aussi bien que les pollutions, qui résultent directement et indirectement de l'utilisation des terres ;
- l'introduction d'espèces exotiques (dont le succès est probablement facilité par le point ci-dessus) ;
- les effets des changements climatiques.

Reste à ajouter la surexploitation et les cascades d'extinctions qui résultent de tous ces changements pour retrouver les quatre « démons » identifiés il y a déjà deux décennies par Jared Diamond et devenus cinq avec la prise en compte des changements climatiques.

Ces changements surviennent aujourd'hui à une si large échelle qu'ils pourraient affecter le fonctionnement de nombreux écosystèmes, de nombreuses espèces, ainsi que la qualité de vie de nombreuses sociétés humaines, avec un coût croissant un peu partout dans le monde.

Mais ce n'est pas toute l'histoire ! Si les changements de biodiversité affectent le bien-être humain, et s'il y a rétroaction, les hommes vont réagir. Aussi devons-nous considérer ces mécanismes de rétroaction – ce qui n'est pas dans le champ et le domaine de compétence de la seule écologie.

Je donnerai deux exemples pour illustrer ce point.

Beaucoup des actuelles directives et conventions internationales, instruments régulateurs locaux et nationaux n'ont pas entraîné une gestion durable de la biodiversité, généralement parce qu'ils ne reconnaissent pas et ne traitent pas des motivations sous-jacentes des divers acteurs.

Pour aller plus loin dans la gestion de la biodiversité nous devons évaluer les mesures de conservation existantes pour voir comment elles affectent les incitations des hommes à conserver la biodiversité. Par exemple, les aires protégées favorisent-elles ou empêchent-elles la conservation de la nature ? Cela dépend largement du contexte humain : comment ces mesures de conservation ont été négociées et appliquées. Ainsi, exclure les populations de l'accès à la nature accroît souvent les menaces plutôt qu'il ne les diminue !

Une importante étape dans l'application des sciences écologiques est la mise en œuvre de plans de restauration pour des espèces menacées ou en danger d'extinction. Puisque, pour être efficaces, les programmes de restauration doivent comporter des mesures de restauration des habitats et de réduction des facteurs de menace (construction de routes, développement urbain, agriculture, détournement des eaux, pollution), les gestionnaires sont confrontés à des questions sociétales.

Ainsi, considérer sérieusement l'ensemble du contexte écologique n'est pas suffisant : nous devons aussi nous intéresser au contexte culturel, économique et social. Dans le même esprit, il n'est pas suffisant d'étudier ce qui survient dans les aires protégées : le rôle de la matrice des terres habitées et exploitées qui les environnent

est tout aussi important. C'est donc une large ouverture et un sérieux approfondissement qui est demandé à l'écologie académique pour faire face à de tels défis.

Encadré 1. Les sept principes de la biologie de la conservation*

Principe n° 1. Le maintien durable de populations saines pour l'ensemble des ressources biologiques sauvages n'est pas compatible avec une croissance illimitée des besoins et demandes des hommes.

Principe n° 2. Le but de la conservation devrait être d'assurer toutes les options d'utilisation présentes et futures en maintenant la biodiversité dans toutes ses composantes, génétique, spécifique et écosystémique.

Principe n° 3. L'évaluation des effets écologiques et socio-économiques de l'utilisation des ressources naturelles doit précéder toute mesure d'extension ou de restriction de celle-ci.

Principe n° 4. La réglementation relative à l'utilisation des ressources vivantes doit reposer sur la connaissance de la structure et de la dynamique de l'écosystème concerné et prendre en compte les influences écologiques et socio-économiques qui affectent directement et indirectement l'utilisation de ces ressources.

Principe n° 5. La gamme complète des compétences et connaissances apportées par les sciences de la nature et de la société doit être mobilisée pour traiter des problèmes de conservation.

Principe n° 6. Toute conservation efficace suppose la prise en compte et la compréhension des motivations, intérêts et valeurs de tous les utilisateurs et acteurs en cause.

Principe n° 7. Une conservation efficace demande une communication interactive, réciproque et continue.

* D'après Mangel *et al.*, 1996

Lorsqu'ils décrivent et analysent de façon approfondie les sept principes de la biologie de la conservation qu'il convient d'appliquer à la gestion des ressources vivantes, Mangel *et al.* (1996) soulignent clairement que tous les problèmes de conservation ont des aspects scientifiques, économiques et sociaux et que, quoique le mélange puisse varier d'une question à l'autre, les trois aspects doivent être pris en compte pour la solution des problèmes (*encadré 1*).

Pour apporter des contributions utiles aux questions de gestion, il est nécessaire de développer les bases scientifiques de la gestion des conflits et des prises de décisions – ce qui n'est pas de la compétence des écologues...

Quelles priorités de recherche pour mieux répondre aux problèmes de conservation ?

Du point de vue de l'écologie j'énoncerais volontiers quatre grandes problématiques qui me paraissent encore trop peu explorées :

- les liens entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes ;
- les réponses des populations et des communautés aux changements climatiques (avec prise en compte explicite des interactions espèces/cycles des éléments et espèces/espèces) ;
- les interactions systèmes naturels/systèmes sociaux, en ciblant notamment sur les problèmes d'accès et d'usages des ressources, d'une part, et des savoirs et pratiques associés, d'autre part ;
- l'épidémiologie écologique et la conservation.

Pour être plus concret, revenons à la thématique, ou plutôt, au vaste champ que représente le premier point.

Dans un chapitre intitulé « How relevant to conservation are studies linking biodiversity and ecosystem functioning? », Lawler, Armesto et Kareiva (2001) soulignent qu'il ne suffit pas de déclarer que, dès lors qu'elles font avancer la théorie écologique et notre compréhension du fonctionnement des écosystèmes, les recherches en biodiversité devraient profiter à la conservation. Encore convient-il de formuler des questions plus spécifiques qui pourraient aider à la préservation et à la gestion des écosystèmes.

Par exemple :

- y a-t-il des signaux, dans la dynamique des communautés ou des processus écologiques, qui annoncent de futurs dommages associés à la perte d'une espèce ou d'un groupe fonctionnel – de sorte que l'on puisse agir ? Il y a là besoin de recherches qui élaborent des outils permettant de prédire le type de crise écosystémique qui pourrait résulter de telles pertes ;
- les systèmes que nous envisageons de protéger sont-ils durables ? On a beaucoup investi dans l'analyse de viabilité des populations : c'est non seulement d'une théorie de viabilité des communautés ou des écosystèmes dont on a le plus besoin aujourd'hui mais aussi d'une véritable théorie sur ce qu'est un développement régional durable !
- les théories et expérimentations relatives aux relations entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes doivent inclure le rôle des régimes de perturbation (feux, par exemple) et des espèces exotiques – qui sont des phénomènes omniprésents ;
- quels facteurs ou circonstances (structures de communautés, régimes de perturbations, échelles spatiales) peuvent conférer aux pertes de diversité des impacts majeurs ?
- on a fort besoin de modèles et d'expérimentations privilégiant les interactions entre espèces, aussi bien qu'entre paysages et sociétés, de manière à mieux dégager les mécanismes en cause.

Pour en savoir plus, je ne puis que renvoyer à l'ouvrage dirigé par Michael Soulé et Gordon Orians (2001).

Chaque chapitre de ce livre comporte un encadré qui récapitule, dans les divers champs identifiés, les priorités de recherche et de gestion formulées sous forme de questions.

Encadré 2

« One of the changes that occurred in conservation biology during the last two decades... is the growing appreciation of the complexity of interactions in nature and of the varied spatial and temporal scales and contexts in which they operate. »

« Today there is a developing awareness of the complex feedbacks at all levels of biological organization, between relatively remote parts of the earth, between developed lands and wildlands, and between human beings and nonhuman biotas. »

Michael Soulé et Gordon H. Orians, 2001

Dans le dernier chapitre intitulé « Conservation Biology research. Its Challenges and Contexts », Michael Soulé et Gordon Orians soulignent les deux changements majeurs qui, à leurs yeux, marquent la biologie de la conservation du XXI^e siècle (*encadré 2*).

On regrettera toutefois une ouverture insuffisante de l'ouvrage sur les points de vue des sciences sociales.

VERS UNE STRATÉGIE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Une rupture stratégique

Au-delà de l'identification de tel ou tel thème de recherche prioritaire, je l'ai dit, quatre constats marquent l'évolution de ce champ de recherche et d'action, quatre nécessités : élargir le spectre spatial et temporel des approches utilisées, prendre en compte le contexte largement anthropisé, s'inscrire dans la perspective d'une gestion durable et relier savoir théorique et mise en œuvre pratique.

Parler de « science d'action », c'est revendiquer la volonté d'afficher une stratégie scientifique, et dans le cas présent, une stratégie qui s'inscrit dans la perspective de ce développement durable dont toute la Terre « résonne » depuis Johannesburg... mais qui est loin d'être mis en œuvre !

Le cadre général à considérer est celui que schématise la figure 3 qui rend bien compte du caractère central des systèmes sociaux.

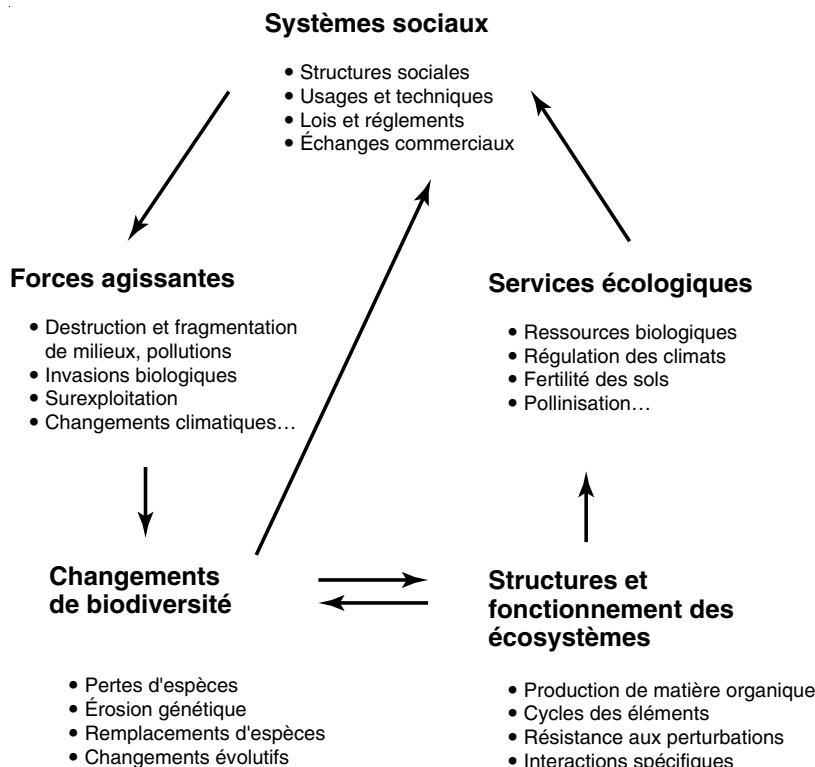


Figure 3. Le rôle central des systèmes sociaux doit être pris explicitement en compte.

Maintenant, pour en venir à un cadrage plus opérationnel, défini par les objectifs de conservation et gestion durables de la biodiversité, il faut souligner que rien ne peut se décider à partir du seul point de vue de l'écologue, ni d'une seule catégorie de chercheurs quelle qu'elle soit.

De fait, les problèmes se posent dans un espace certes écologique, mais aussi humain, c'est-à-dire social et économique. Un espace où interviennent d'autres acteurs que les seuls chercheurs (Barbault, 2000). La figure 4 en donne une représentation simplifiée. À noter que la catégorie « gestionnaires » implique aussi bien les gestionnaires d'espaces protégés que les agriculteurs, les forestiers voire les chasseurs et les pêcheurs...

En d'autres termes, les systèmes écologiques à partir desquels il convient de poser les questions relatives à la dynamique de la biodiversité sont d'abord des terres occupées par des hommes, des champs, des forêts et des prairies, des espaces protégés et des milieux urbains – bref, des espaces qui relèvent de ce que l'on appelle l'aménagement du territoire.

De ce point de vue il serait dommage de ne pas s'appuyer sur l'expérience accumulée par le dispositif des espaces protégés – et notamment, dans le cadre du programme MAB de l'Unesco, par le réseau des réserves de biosphère – dont l'expérience couvre trois décennies.

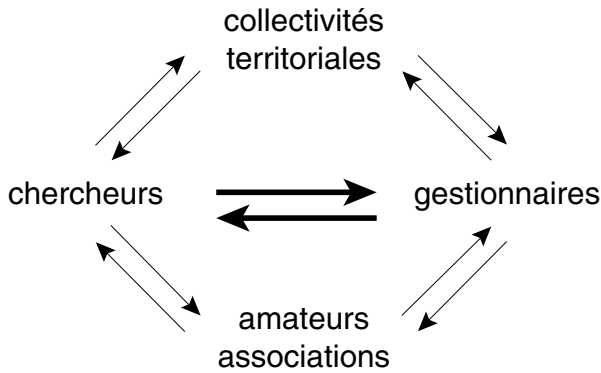


Figure 4. Le renforcement des échanges et partenariats entre monde de la recherche et monde de la gestion des milieux et des espèces est un impératif qui doit éclairer toute la stratégie à mettre en œuvre.

À propos des réserves de biosphère

En 1971, lorsque le programme « L'Homme et la biosphère » est lancé par l'Unesco, une rupture majeure est introduite dans les politiques de protection de la nature : les réserves de biosphère qui vont être mises en place, à l'initiative des États, mais sur la base d'une concertation locale préalable entre les pouvoirs publics et les utilisateurs et occupants de l'espace concerné, partent d'interrogations et de réflexions sur les relations entre les sociétés humaines et leur environnement. Elles ont été conçues pour répondre à l'une des questions centrales dans ce que l'on appelle aujourd'hui le développement durable : comment concilier la conservation de la biodiversité et des ressources biologiques qu'elles représentent avec un développement social et économique des populations qui en dépendent – ce qui transcende frontières géographiques et frontières politiques ? Ainsi, ces réserves de biosphère doivent remplir trois fonctions interdépendantes : une fonction de conservation ; une fonction de développement durable à l'échelle locale, avec ses trois composantes, sociale, économique et culturelle ; une fonction logistique, pour la recherche, la surveillance continue (*monitoring*), la formation et l'éducation. Certes, entre l'objectif et le « réalisé » il y a eu parfois de la distance, des déconvenues, ce qui a conduit l'Unesco (1996) à une profonde évaluation et une relance : c'est ce que l'on appelle la stratégie de Séville.

Je n'en reprendrai pas ici l'argumentation, qui fait du réseau des réserves de biosphère l'instrument privilégié d'une stratégie de développement durable (*encadré 3*), pour retenir un point à mes yeux essentiel : le dispositif des espaces protégés doit être au cœur d'une stratégie de gestion durable de la biodiversité et le pivot de la conservation dans ses volets recherche, pédagogie, communication, formation et conservation *stricto sensu*.

Encadré 3. La stratégie de Séville

Grand objectif 1. Utiliser les réserves de biosphère pour conserver la biodiversité naturelle et culturelle :

- Améliorer la couverture de la diversité naturelle et culturelle par le réseau mondial de réserves de biosphère
- Intégrer les réserves de biosphère dans la planification de la conservation

Grand objectif 2. Utiliser les réserves de biosphère comme modèles d'aménagement du territoire et lieux d'expérimentation du développement durable :

- S'assurer du soutien et de la participation des populations locales
- Mieux assurer l'ajustement harmonieux des différentes zones de la réserve de biosphère et leurs interactions
- Intégrer les réserves de biosphère dans la planification régionale

Grand objectif 3. Utiliser les réserves de biosphère pour la recherche, la surveillance continue, l'éducation et la formation :

- Améliorer les connaissances sur les interactions entre l'homme et la biosphère
- Améliorer les activités de surveillance continue
- Améliorer l'éducation, la sensibilisation du public et sa participation
- Améliorer la formation des spécialistes et des gestionnaires

Grand objectif 4. Mettre en application le concept de réserve de biosphère :

- Intégrer les fonctions des réserves de biosphère
- Renforcer le réseau mondial de réserves de biosphère

Mais cela suppose au moins deux types de développements, qui restent insuffisants ou absents : le renforcement des relations entre monde de la recherche et monde de l'aménagement et la mise en place ou le développement de dispositifs de suivis à long terme couplés à des recherches comparatives et expérimentales.

La mise en œuvre d'un dispositif efficace et durable de suivi de la biodiversité ou de telle ou telle de ses composantes est une tâche complexe, délicate... et qui dérange.

Elle soulèvera donc, outre les obstacles intrinsèques que j'évoquerai dans un instant, des oppositions qu'il faudra apprendre à gérer. Des oppositions par manque d'enthousiasme de la part des politiques, des élus ou des pouvoirs publics : « encore un machin qui va coûter cher et dont on ne voit pas l'intérêt » ! Mais aussi des oppositions plus vicieuses, qui sauront se dissimuler derrière les précédentes pour faire échouer des initiatives dérangeantes – et émanant de groupes de pression divers dont les intérêts peuvent être contrariés par un cadrage écologique de l'aménagement du territoire et de la gestion de ses ressources – ou par la simple réorientation de moyens financiers que cela suppose, moyens qu'il faudra bien prendre quelque part !

En d'autres termes, et cela n'est pas le moindre défi pour les écologues, le penser écologique est subversif dès qu'il se mêle d'orienter les pratiques de gestion ou de conservation. Il est subversif en posant des questions qui transcendent les disciplines scientifiques ; mais il l'est plus profondément encore en soulevant des questions qui touchent au fonctionnement du complexe scientifico-industriel, au politique et aux orthodoxies installées en matière de développement économique et social.

Un *monitoring* efficace

Kay *et al.* (2002) prônent une *adaptive ecosystem approach* pour le *monitoring* conçu en soutien ou à l'appui de politiques publiques. Ils relèvent notamment que le développement de programmes de *monitoring* est trop souvent considéré comme synonyme de production d'indicateurs, comme si il existait un jeu bien établi de choses à mesurer. La faiblesse de ce type d'inventaire est d'être déconnecté du contexte, c'est-à-dire des hommes et de leurs préoccupations ou de leurs intérêts.

On est confronté là à des systèmes complexes, pour lesquels nous manquons d'instruments adaptés : de nouvelles approches sont nécessaires, qui incorporent la complexité dans les programmes de *monitoring* et permettent d'appréhender les questions de « soutenabilité ».

En quoi consiste un suivi conçu à des fins de gestion, directement ou indirectement – c'est-à-dire un suivi qui renseigne sur l'évolution d'un milieu, d'un peuplement, d'une population ?

Il doit être conçu pour répondre à des objectifs et des questions aussi clairs que possible et établis en articulation avec les utilisateurs de l'information recherchée.

À partir de ce ciblage et des connaissances dont on dispose sur la structure et le fonctionnement du système concerné – un espace naturel, avec ses composantes essentielles et saisi dans la trame écologique et socio-économique où il se place – il s'agit d'abord de sélectionner les variables à suivre et mesurer en cherchant à définir des jeux d'indicateurs pertinents aussi simples et fiables que possible ; ensuite, de préciser la stratégie d'échantillonnage et de mesure pertinente dans toutes ses dimensions, spatiales et temporelles ; enfin, de standardiser les méthodes de mesure pour réduire les biais individuels et accroître la comparabilité des mesures obtenues.

Faut-il souligner que dans ces domaines les suivis, à la différence de ceux que pratique la météorologie par exemple, se heurtent à des difficultés particulières qu'il faut prendre en compte : (1) les objets ou indicateurs à appréhender – des populations animales ou végétales, des traits de milieux – sont « mouvants » (ils évoluent) ; (2) leur appréhension suppose des investissements humains répétés (problèmes de coût et de standardisation) ; (3) l'impératif du long terme nécessite, à la fois, une « souplesse adaptative » dans la mise en œuvre et la recherche d'une valorisation multiple (pour diminuer le rapport coût/bénéfice).

En d'autres termes, pour assurer, à la fois, la pertinence des choix effectués, la capacité d'analyse et d'interprétation des données et valoriser les investissements consentis, le couplage entre suivis opérationnels et opérations de recherche doit être prévu dès le départ. De fait, il faut être capable de relier les variations des indica-

teurs suivis aux paramètres qui les expliquent puis aux facteurs de l'environnement qui affectent ces derniers : comprendre pour agir et le champ à considérer est large et complexe (*figure 5*) !

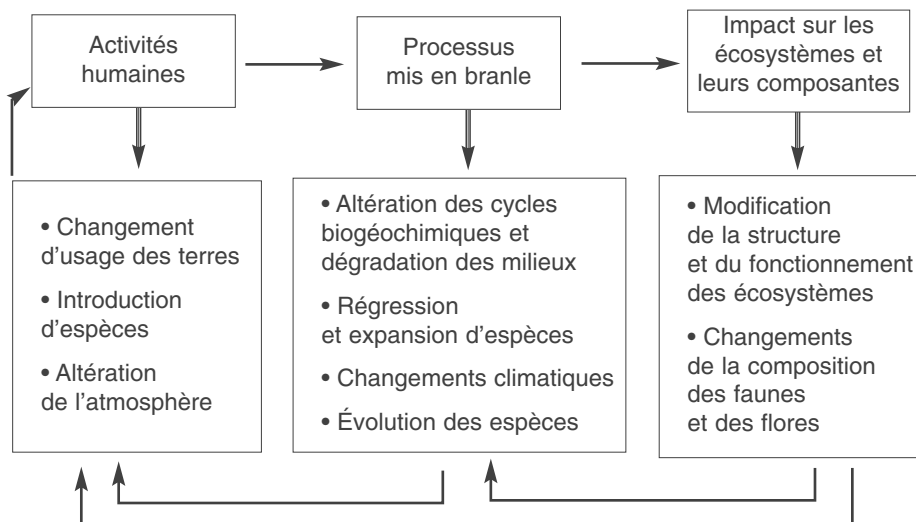


Figure 5. Principaux processus mis en branle par les activités humaines et impacts résultants sur les écosystèmes et leurs composantes : c'est dans cette toile de fond complexe que les objectifs et éléments des programmes de suivi doivent être conçus.

Voilà pourquoi s'avère nécessaire l'établissement de connections durables entre monde de la recherche et monde de la gestion, lesquelles supposent d'ailleurs des interactions plus larges (*figure 4*) puisque les associations et réseaux d'amateurs constituent une composante essentielle de tels observatoires.

Enfin, deux caractéristiques doivent être prises en compte dans les suivis scientifiques conçus pour la gestion des espaces naturels : l'insertion dans des réseaux de prises de mesure nationaux et continentaux d'une part, et la hiérarchisation des efforts d'autre part.

En conclusion, nous sommes là dans l'esprit de ce qui entrera logiquement dans une stratégie nationale de développement durable – et invités à travailler en réseaux coordonnés où chercheurs, associations, gestionnaires œuvreront sinon toujours ensemble du moins en connaissance de ce que font les uns et les autres – et cela dans l'intérêt supérieur d'une conservation de la nature... durable !

CONCLUSION

Ainsi, la biologie de la conservation d'une part, l'objectif stratégique de développement durable d'autre part, conduisent l'écologie à de nouveaux approfondissements, à une nouvelle mutation.

Pour répondre à ce défi, il lui faut non seulement élargir son champ, jouer de la diversité de ses « rejets » pour parler le langage de l'horticulture – biologie de la

conservation, écologie du paysage, écologie humaine, écologie industrielle, écologie de la restauration... – mais aussi s'ouvrir et se mêler à d'autres dynamiques scientifiques qui animent avec elle le champ de l'environnement et qui s'inscrivent cependant dans d'autres corpus scientifiques : géographie, anthropologie, sociologie, économie, etc.

Il lui faut aussi accepter de se confronter aux contraintes de terrain, celles que connaissent d'autres acteurs des choses de la nature – que j'appellerai ici, pour simplifier, les gestionnaires.

En d'autres termes, la prise en compte de l'homme invoquée par les tenants de la biologie de la conservation moderne, ne doit pas se limiter à la reconnaissance d'une capacité de gestion ou de dégradation. Il faut l'élargir à l'ensemble de ses dimensions. Pour rendre opérationnelles les questions de recherche, la modélisation ou les expérimentations, pour faciliter les nécessaires dialogues avec d'autres secteurs de recherche, d'autres acteurs de la stratégie du développement durable à élaborer. L'expérience des acteurs de la conservation, amateurs, ONG ou gestionnaires, sera ici très précieuse.

Enfin, pour m'en tenir à une seule proposition concrète, susceptible de faire avancer les choses dans le sens évoqué ci-dessus, je défendrai la nécessité de mettre en œuvre un programme ambitieux de *monitoring* des espaces écologiques d'intérêt que constitue le réseau des espaces protégés. À la fois parce qu'il y a là un véritable besoin pour un appui efficace aux politiques publiques en matière de conservation de la nature et d'aménagement du territoire et parce qu'un tel objectif devrait contribuer à stimuler et renforcer la synergie tant souhaitée entre monde de la recherche et monde de la gestion. Les résultats de la recherche ne pouvant que profiter au *monitoring* en termes d'amélioration des méthodes pour la collecte et l'analyse des données ; la connaissance des causes et des effets étant essentielle pour la conception d'un programme efficace. Réciproquement, les données du suivi – s'il a été bien conçu – peuvent servir des objectifs de recherche. Les hypothèses et résultats d'études spécifiques peuvent être testés pour leur transférabilité à des échelles d'espace et de temps plus larges. Les résultats de la recherche et du *monitoring* devraient constituer la base scientifique pour le développement de nouvelles politiques et mesures environnementales.

Un défi qui vaut la peine d'être relevé.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AUBERTIN C., BOISVERT V. & F. D. VIVIEN, 1998, La construction sociale de la question de la biodiversité, *Natures Sciences Sociétés*, 6, p. 7-19.
- BALMFORD A., MACE G. M. & J. R. GINSBERG, 2002, The Challenges to Conservation in a Changing World: putting Processes on the map, p. 1-28, in G. M. MACE, A. BALMFORD & J. R. GINSBERG (eds), *Conservation in a Changing World*, Cambridge university Press.
- BARBAULT R., 1992, *Écologie des peuplements. Structure et dynamique de la biodiversité*, Paris, Masson.

- BARBAULT R., 1993, Une approche écologique de la biodiversité, *Natures Sciences Sociétés*, 1, p. 322-329.
- BARBAULT R., 2000, Recherche fondamentale et pratiques de conservation : un dialogue indispensable, *Rev. Écol. (Terre Vie)*, suppl. 7, vol. 55, p. 11-17.
- BROWN J. H., 1995, *Macroecology*, Chicago, The University of Chicago Press.
- DI CASTRI F. & T. YOUNÈS (eds), 1996, *Biodiversity, Science and Development. Towards a New Partnership*, Oxford, CAB International.
- KAY J. J., BOYLE M. & B. POND, 2002, Monitoring in support of policy: an adaptive ecosystem approach, p. 116-137, in TED MUNN (ed.), *Encyclopedia of Global Environmental Change*, vol. 4, New-York, John Wiley & Sons.
- LARRÈRE C., 1997, *Les philosophies de l'environnement*, Paris, PUF.
- LAWLER S. P., ARMESTO J. J. & P. KAREIVA, 2001, How relevant to conservation are studies linking biodiversity and ecosystem functioning, p. 294-313, in A. P. KINZIG, S. W. PACALA & D. TILMAN, *The Functional Consequences of Biodiversity*, Princeton University press.
- LEAKEY R. & LEWIN R., 1997, *La Sixième extinction. Évolution et catastrophes*, Paris, Flammarion.
- MACE G. M., A. BALMFORD & J. R. GINSBERG, 2002, *Conservation in a changing world*, Cambridge University Press.
- MACARTHUR R. H. & WILSON E. O., 1967, *The theory of island biogeography*, N.Y., Princeton University Press.
- MANGEL M. *et al.*, 1996, Principles for the conservation of wild living resources, *Ecological Applications*, 6, p. 338-362.
- PERRINGS C. & M. GADGIL, 2002, *Pour une protection efficace et équitable de la biodiversité*, Paris, Iddri et Medd, 2002.
- PIMM S., 1991, *The balance of nature? Ecological issues in the conservation of species and communities*, Chicago, The Chicago University Press.
- POSSINGHAM H. P., S. Y. ANDELMAN, B. R. NOON, S. TROMBULAK & H. R. PULLIAM, 2001, Making smart conservation decisions, p. 225-244, in M. E. SOULÉ & G. H. ORIANI (eds), *Conservation Biology Research. Priorities for the Next Decade*, Washington, Island Press.
- SOULÉ M. & G. H. ORIANI, 2001, *Conservation Biology. Research priorities for the next decade*, Washington, Island Press.
- TEYSSÈDRE A., 2005, Vers une sixième grande crise d'extinction ? in BARBAULT R. & B. CHEVASSUS-AU-LOUIS (dir.), *Biodiversité et changements globaux. Enjeux de société et défis pour la recherche*, p. 42-49, Paris, adpf, ministère des Affaires étrangères.
- UNESCO, 1996, *Réserve de biosphère : la stratégie de Séville et le cadre statutaire du réseau mondial*, Paris, Unesco.
- VITOUSEK P. M., H. A. MOONEY, J. LUBCHENCO & J. M. MELILLO, 1997, Human domination of earth's ecosystems, *Science*, 277, p. 494-499.
- WEDDELL B. J., 2002, *Conserving Living Natural Resources*, Cambridge, Cambridge University Press.
- WILSON E. O., 1988, *Biodiversity*, Washington, National Academy Press Washington D.C.

Les auteurs

Robert BARBAULT

Professeur à l'université Pierre et Marie Curie
UMR Conservation des espèces, restauration
et suivi des populations
CNRS, MNHN
61 rue Buffon
75005 - Paris
biodiv.barbault@snv.jussieu.fr

Jacques-Louis de BEAULIEU

Directeur de recherche au CNRS
Imep, UMR Europôle Méditerranéen
de l'Arbois, CNRS
Bâtiment Villemin
BP 80
13545 - Aix-en-Provence
Jacques-Louis.de-Beaulieu@univ.u-3mrs.fr

Philippe CLERGEAU

Chercheur à l'Inra
Directeur adjoint de l'unité Scribe
Inra Scribe
Avenue du Général Leclerc
35042 - Rennes Cedex
philippe.clergeau@rennes.inra.fr

Claude COMBES

Professeur honoraire à l'université de Perpignan
Membre de l'Académie
Centre de biologie et écologie tropicale
et méditerranéenne
Université de Perpignan
Avenue P. Alduy
66960 - Perpignan Cedex
combes@univ-perp.fr

Philip S. CRAIG

Professeur à l'université de Salford
Biosciences Research Institute
University of Salford
Salford M5 4WT
Royaume-Uni
p.s.craig@salford.ac.uk

Jean-Claude CZYBA

Professeur honoraire à l'université Claude
Bernard, Lyon 1,
Chef de service honoraire
des Hôpitaux de Lyon
9 rue Jeanne d'Arc
69003 - Lyon
czyba@rockefeller.univ-lyon1.fr

Henri DÉCAMPS

Directeur de recherche émérite au CNRS
Membre de l'Académie
Laboratoire Dynamique de la Biodiversité
(Ladybio), CNRS/UPS
29 rue Jeanne Marvig
BP 4349
31055 - Toulouse Cedex 4
hdecamps@cict.fr

Jean-Pierre DEFFONTAINES

Directeur de recherche émérite à l'Inra
27 rue Anatole France
92370 - Chaville
jp.deffontaines@wanadoo.fr

Patrick GIRAUDOUX

Professeur à l'université de Besançon
Laboratoire de biologie environnementale
USC Inra-EA 3184
Université de Franche-Comté
Place Leclerc
25030 - Besançon Cedex
patrick.giraudoux@univ-fcomte.fr

Francis LALOË

Directeur de recherche à l'IRD
Centre d'économie et d'éthique pour
l'environnement et le développement
UMR C3ED, IRD-UVSQ
IRD Montpellier
BP 64501
34 394 - Montpellier Cedex 5
laloe@mpl.ird.fr

Sylvie LARDON

Chargée de recherche à l'Inra
Inra-Sad, Engref POP'TER
UMR Metafort
Domaine universitaire des Cézeaux
24 av. des Landais, BP 90054
63171 - Aubière Cedex 9
lardon@engref.fr

Jean-Marie LEGAY

Professeur émérite honoraire
à l'université Lyon 1
Laboratoire biométrie et biologie évolutive
UCB - Lyon 1 - bat. G. Mendel
69622 - Villeurbanne Cedex
misou@biomserv.univ-lyon1.fr

Gwenaëlle LE LAY

Docteur en écologie
Inra Scribe & UMR EcoBio
Avenue du Général Leclerc
35042 - Rennes Cedex

Yvon LE MAHO

Directeur de recherche au CNRS
Membre de l'Académie
Centre d'écologie, physiologie et éthologie
CNRS
23, rue Becquerel
67087 - Strasbourg Cedex 2
yvon.lemaho@c-strasbourg.fr

Isabelle MANDON-DALGER

Docteur en écologie
Inra Scribe & UMR EcoBio
Avenue du Général Leclerc
35042 - Rennes Cedex

Claude MILLIER

Directeur scientifique à l'Ina-PG et à l'Engref
Président de l'association NSS-Dialogues
Ina-PG
16 rue Claude Bernard
75231 - Paris Cedex 5
millier@inapg.inra.fr

Jean-Claude MOUNOLOU

Professeur honoraire à l'université de Paris-Sud
10 rue des Glycines
91140 - Villebon-sur-Yvette
mounoloujcm@wanadoo.fr

Pascal THINON

Chercheur à l'Inra
Inra - UMR Innovation
2 place Viala
34060 - Montpellier Cedex
thinon@ensam.inra.fr

Dominique Angèle VUITTON

Professeur à l'université de Franche-Comté
EA 2276 Santé et environnement rural
Université de Franche-Comté
Centre collaborateur pour la prévention
et le traitement des echnococcoses humaines
Faculté de médecine et de pharmacie
Place Saint-Jacques
25030 - Besançon
dominique.vuitton@univ-fcomte.fr

Nigel G. YOCCOZ

Professeur à l'université de Tromsø
Institut norvégien de recherche
sur l'environnement
Centre de recherche
sur les environnements polaires
N-9296 Tromsø
Institut de biologie, université de Tromsø
N-9037 Tromsø
Norvège
nigel.yoccoz@ib.uit.no