

Prospective de l'INstitut Ecologie et Environnement du CNRS

Compte-rendu des journées des 12 et 13 mai 2009, Rennes



INEE
Institut **écologie** et **environnement**



Compte-rendu des journées de prospective de l'institut écologie et environnement (INEE) du CNRS 12 et 13 mai 2009, Rennes

Ont participé à la rédaction de ce document

Sous la direction de
Françoise Gaill, directrice scientifique de l'institut écologie et environnement du CNRS

Comité de pilotage
Jean Christophe Auffray, Robert Barbault, Bruno David, Jean-Jacques Delannoy, Sylvie Derenne, Olivier Donard, Aurélie Dubreuil, Josette Garnier, Yvan Lagadeuc, Yvon Le Maho, Stéphanie Thiébaud, Christiane Weber

Rapporteurs
Fabien Arnaud, Pierre-Marie Badot, Nicolas Buclet, Françoise Burel, Pierre Caumette, Rachid Cheddadi, Denis Couvet, Brigitte Crouau-Roy, Amy Dahan, Bruno David, Jean-Jacques Delannoy, Gilles Escarguel, Jean-Pierre Feral, Didier Galop, Eric Garnier, Cynthia Ghorra-Gobin, Françoise Gourmelon, Jean-Marc Guarini, Laurence Hubert-Moy, Martine Hossaert-McKey, Philippe Janvier, Frédéric Jiguet, Yvon Le Maho, Marc Lemaire, Dominique Marguerie, Jean-Paul Métailié, Serge Morand, Pascal Neige, Didier Neraudeau, Hervé Richard, Marc Robin, Thierry Taton, Frédérique Viard, Jean-François Viel, Jean-Denis Vigne, Christiane Weber

Avec la participation de
Luc Abbadie, Catherine Bastien-Ventura, Robert Barbault, Marie-Louise Cariou, Olivier Donard, Aurélie Dubreuil, Yvan Lagadeuc, André Mariotti, Pierre Matarasso, Isabelle Rico-Lattes, Stéphanie Thiébaud, Marc Trousselier

Secrétariat de rédaction
Aurélie Dubreuil, Yvan Lagadeuc, Stéphanie Thiébaud

Avant-propos	7
Compte-rendu des ateliers	9
1. Réponses aux changements globaux.....	10
2. Echelles temporelles et dynamique de la biodiversité	17
3. De l'anthropisation à l'artificialisation des milieux et du vivant	26
4. Etudes de nouveaux biomes	31
5. Environnement et santé	41
6. Ecologie chimique et chimie écologique.....	45
7. Evaluation environnementale	49
8. Durabilité et usages	53
9. Outils /Grands Equipements /Nouvelles technologies	56
Annexes	61
Annexe 1 - Article NSS sur les systèmes socio-écologiques	62
Annexe 2 - Liste des principaux acronymes	65

■ L'année 2009 marque la création, aux côtés des 9 autres instituts du CNRS, de l'Institut Ecologie et Environnement (INEE). Cette création doit beaucoup à la dynamique impulsée par le département scientifique « Environnement et Développement Durable ». Créé en janvier 2006, ce département avait pour mission de mobiliser les unités de recherche et le potentiel humain et matériel du CNRS autour des enjeux environnementaux et des problématiques du développement durable. En trois ans, il a su créer les bases d'une nouvelle communauté scientifique désireuse de travailler sur les effets induits par le changement global et la mondialisation des activités humaines, notamment ceux qui touchent l'écologie, la biodiversité, la vulnérabilité des ressources et des territoires et la santé.

Une nouvelle étape s'ouvre aujourd'hui qui est de faire des sciences de l'environnement un domaine scientifique reconnu, lisible et porteur. Il est de la responsabilité de l'INEE d'œuvrer à la mise en place d'une approche résolument intégrative des sciences de l'environnement pour développer une «écologie globale». Cela passe par la mobilisation des différents champs scientifiques s'y rapportant et en particulier de ceux qui constituent le cœur disciplinaire de l'Institut, à savoir l'écologie, la biodiversité et les relations hommes-milieux. Ces domaines font appel à de nombreuses disciplines parmi lesquelles on compte la biologie, la chimie, les sciences sociales et humaines, mais également les sciences de l'évolution et les géosciences pour n'en citer que quelques unes. Cela passe également par la volonté de répondre aux demandes sociétales en matière de diagnostic, d'expertise, d'ingénierie écologique, d'aide à la décision et à la remédiation.

Favoriser l'innovation dans les sciences de l'environnement, soutenir et mettre en œuvre des outils spécifiques et rapprocher la recherche de l'action sont les 3 orientations stratégiques de l'Institut. L'INEE s'appuie désormais sur un noyau de 80 unités pour lesquelles il est «institut référent» et sur plus de 130 unités pour sa fonction d'agence. Par son positionnement dans le champ des sciences de l'environnement, l'INEE poursuit sa collaboration avec les autres instituts du CNRS, les autres organismes de recherche, et les établissements d'enseignement supérieur.

Comprendre la biosphère pour agir exprime la démarche de l'Institut autour de l'écologie globale, démarche qui s'appuie sur 5 axes scientifiques majeurs : i) biodiversité et écologie fonctionnelle, ii) adaptation, adaptabilité et évolution dans des contextes d'environnements changeants, iii) analyse et gestion des services écosystémiques, iv) rétroactions des systèmes écologiques et changements globaux, et enfin v) anthropisation et artificialisation des milieux et du vivant. Excellence scientifique, ouverture pluridisciplinaire et mise en place de pôles nationaux résumant les objectifs de politique scientifique de l'INEE.

Les ateliers de la prospective INEE reflètent le croisement des axes de recherche précités et des thèmes intégrateurs, identifiés lors de la défi-

nition du périmètre de l'Institut. Pour mémoire ces 10 thèmes étaient : i) évaluation environnementale, ii) durabilité environnementale, iii) de l'écologie à l'écologie globale, iv) de l'anthropisation à l'artificialisation des milieux, v) biodiversité : un contexte d'évolution, vi) adaptation changements environnementaux et évolution, vii) ingénierie écologique, viii) études de nouveaux biomes-anthroposystèmes majeurs, ix) environnement et santé, et x) chimie écologique et écologie chimique.

Le colloque de prospective de l'INEE, organisé à Rennes en mai 2009, a été l'occasion de réunir la communauté scientifique de l'INEE, avec aussi des scientifiques de l'Institut National des Sciences de l'Université (INSU) et de l'Institut des Sciences Humaines et Sociales (INSHS) du CNRS. Les chercheurs de l'Inra, du Cemagref, de l'IRD, de l'Ifremer et des membres de la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (FRB) et de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) ont également participé à ces journées.

Ces journées de Rennes s'inscrivent comme le colloque fondateur de l'Institut Ecologie et Environnement. Elles ont impulsé une dynamique collective pour réaliser un premier état des lieux et dessiner ce que sera la recherche menée à l'INEE à l'horizon 2020. Le fruit de ces réflexions est présenté dans ce document qui est un outil de communication et de diffusion des idées. Il est destiné à construire une communauté interdisciplinaire autour de l'écologie globale.

Le colloque de prospective s'est organisé autour de 9 ateliers à vocation programmatique, dont les thématiques ont été identifiées autour des enjeux scientifiques et des orientations stratégiques de l'INEE. Les thèmes ont été définis par un comité de pilotage regroupant des membres du Conseil Scientifique et de l'équipe de direction de l'INEE.

Les intitulés des 9 ateliers étaient les suivants :

- Atelier 1 Réponses aux changements globaux
- Atelier 2 Echelles temporelles et dynamique de la biodiversité
- Atelier 3 De l'anthropisation à l'artificialisation des milieux et du vivant
- Atelier 4 Etudes de nouveaux biomes
- Atelier 5 Environnement et santé
- Atelier 6 Ecologie chimique et chimie écologique
- Atelier 7 Evaluation environnementale
- Atelier 8 Durabilité et usages
- Atelier 9 Outils/Grands Equipements /Nouvelles technologies

L'objectif du travail de prospective était de favoriser les échanges entre communautés disciplinaires de l'INEE, d'identifier les axes de recherche émergents et de replacer les thématiques de recherche de l'INEE dans le contexte des enjeux actuels de société. Des textes de réflexion ont été mis à la disposition de l'ensemble de la communauté sur le site web de l'Institut avant la tenue du colloque (<http://www.cnrs.fr/inee/recherche/prospectiveRennes.htm>). Ce travail initial a permis aux chercheurs de

s'impliquer dans les débats, avant les journées de Rennes, et de faire remonter les enjeux discernés par les laboratoires.

Je vous invite à lire chacune des synthèses de ces 9 ateliers. On remarque plusieurs points de convergence tant dans l'énoncé des approches qui restent à adopter, que dans les outils qui sont à développer. Ce document ne reflète que partiellement le contenu des discussions qui se sont tenues à Rennes, mais il en indique les traits saillants. Il permet d'énoncer les priorités et les pistes d'actions, les partenariats avec les instituts ou établissements de recherche, et de préciser les outils qu'il convient de mettre en œuvre ou de développer.

Dans tous les cas, il est à noter que l'humain n'est plus considéré comme un élément « perturbateur », mais fait désormais partie prenante du fonctionnement et de l'évolution des systèmes environnementaux. Il est à ce titre un producteur d'environnements nouveaux et originaux. Il reste à intégrer cette évidence dans les démarches des sciences de l'environnement.

Les activités humaines induisent des changements écologiques et environnementaux d'ampleur planétaire. Comment caractériser ces changements ? Comment les systèmes écologiques et les sociétés humaines peuvent-ils les maîtriser ? Comment identifier et définir un état de référence ? Comment distinguer les effets d'origine anthropique de ceux des changements naturels qui affectent et ont affecté le système Terre au cours de son histoire ?

Ces questions ouvrent de vastes champs de recherche qui nécessitent des approches nouvelles pour aborder l'étude des éco et anthroposystèmes. D'autres domaines restent à investir par les équipes de l'INEE comme par exemple l'évo/dévo, l'écologie chimique, l'ingénierie écologique. . . . Travailler sur l'articulation actuel/passé apparaît décisif pour plusieurs ateliers. L'étude de nouveaux biomes, comme la ville, le littoral ou la montagne, domaines de recherches multidisciplinaires, est à soutenir ; développer une écologie de la santé est un enjeu majeur. L'organisation de réseaux, de rencontres et d'échanges multidisciplinaires à travers des écoles thématiques ou des séminaires contribuera à renforcer ces domaines de recherche.

Se dessinent plusieurs demandes comme l'implantation d'un réseau national d'observatoires spécifiquement dédié à l'étude des réponses aux changements planétaires. Il en est de même pour l'étude de l'évolution de la biodiversité qui requiert des démarches analogues. Les Zones Atelier (ZA) et Observatoires Hommes Milieux (OHM) sont des outils d'analyse stratégiques et spécifiques à l'INEE qui peuvent nourrir la réflexion sur les questions de suivi (monitoring) de la biodiversité ou de gestion de systèmes écologiques. Comment utiliser, gérer et valoriser les archives naturelles est une autre question récurrente. La demande de constitution de bases de données est un enjeu capital qui doit faire

l'objet d'une réflexion approfondie pour aboutir à la mise en œuvre de systèmes d'informations performants. Ce sera une des priorités de l'INEE dans les années à venir.

L'étude des liens entre la diversité du vivant, l'évolution et le fonctionnement de la biosphère requiert de nouvelles théories qui pourront être testées, non seulement en recourant à des observations, mais aussi et surtout au travers d'expérimentations directement réalisables sur des écosystèmes naturels ou artificiels. L'approche expérimentale est ainsi au centre de nos préoccupations. La manipulation in situ est un premier volet qui consiste à introduire, dans les écosystèmes naturels, des sources de perturbations pour observer la réponse de l'ensemble des composantes étudiées. L'expérimentation sur des systèmes simplifiés, ou reconstruits, est le second volet qui permet de se focaliser sur une quantité réduite de composantes, pour étudier un petit nombre de facteurs biotiques et abiotiques. Ecotrons et plateformes expérimentales sont et seront soutenus par l'INEE pour développer ces approches au niveau national européen et international.

Je vous souhaite une bonne lecture !

Françoise Gaill
Octobre 2009

Compte-rendu des ateliers

Rapporteur : Eric Garnier

Avec la collaboration de : Fabien Arnaud, Françoise Burel, Frédéric Jiguet, Dominique Marguerie, Frédérique Viard.

■ Il est maintenant bien établi que les activités humaines, motivées par des objectifs économiques, politiques, culturels, intellectuels, esthétiques ou spirituels induisent des changements écologiques et environnementaux d'ampleur planétaire. Comment les systèmes écologiques et les sociétés humaines peuvent-ils les maîtriser ? Comment distinguer les effets d'origine anthropique de ceux des changements naturels qui affectent et ont affecté le système Terre au cours de son histoire ? Ces questions ouvrent de vastes champs de recherche qui nécessitent des approches nouvelles et intégrées des éco- et anthropo-systèmes.

Restitution de l'atelier

_Les composantes du changement planétaire

Les changements planétaires concernent les terres émergées, l'atmosphère, les eaux douces et marines, les zones côtières et le compartiment biotique. On reconnaît généralement plusieurs types de changements : (1) les modifications d'usage des terres (défrichement, déforestation, pâturage, intensification agricole, urbanisation), (2) les modifications des cycles biogéochimiques (carbone, azote, eau, composés chimiques synthétiques...), (3) les additions et pertes biotiques (chasse, pêche, invasions). Ces trois composantes, isolées ou en combinaisons ont des impacts sur le climat (via l'augmentation des gaz à effet de serre, des aérosols, de la capacité de rétention en eau du sol, de l'albédo) et sont à l'origine de pertes de diversité biologique, notamment par destruction des habitats et/ou surexploitation par les populations. L'étude des impacts des changements planétaires dépasse donc largement la seule étude des impacts du changement climatique.

Un premier axe de recherche concerne la **caractérisation de ces changements**. Il s'agit de les traduire en termes de variables mesurables, adaptées aux processus étudiés et aux échelles de temps et d'espace concernées. Quatre volets au moins sont à considérer :

1. l'élaboration d'un mode de description pertinent des milieux en termes, par exemple, de régimes de perturbation (utilisation des terres), de disponibilité des éléments (biogéochimie) ou de conditions climatiques (microclimat) ;
2. l'identification des variables qui déterminent les réponses (pour le climat : températures moyennes ou extrêmes ? pluies annuelles ou événementielles ? etc.) ;
3. la prise en compte de la cinétique de ces changements, dans la mesure où l'une de leurs caractéristiques majeures tient en leur extrême rapidité par rapport à ceux qui ont pu avoir lieu

dans le passé (ex. taux d'extinction actuel des espèces 1000 fois supérieur à ce qui est observé à partir de l'étude des fossiles). Cette rapidité est probablement l'un des facteurs clés qui va contrôler la réponse des systèmes biologiques aux forçages anthropiques ;

4. la prise en compte des différentes composantes du changement planétaire (ex. climat et changement d'utilisation des terres) pour démêler les réponses croisées et boucles de rétroaction entre systèmes biologiques et sociétaux.

Un second axe concerne **l'identification et la définition d'un état de « référence »** pour juger de l'intensité, de la cinétique, de la gravité des changements et de la réponse des systèmes à ceux-ci. Où en est-on sur la cinétique de la réponse ? A-t-on épuisé les potentialités de réponse ? On ne peut répondre à ces questions que si l'on est en mesure de se fixer « une » référence à partir de laquelle les variables du changement et la réponse des systèmes pourront être évaluées. La démarche actuellement préconisée consiste à chercher des états de « référence » généralisables à des ensembles d'écosystèmes comparables. Dans le cas, par exemple, des plans d'eau, le recours à des études paléoécologiques est recommandé. Toutefois, la notion d'état de référence est difficile à appréhender dans la mesure où les écosystèmes terrestres, comme aquatiques, ont subi des modifications d'origine anthropique souvent depuis plusieurs millénaires et qu'il s'agit, par définition, dynamiques. Ceci est particulièrement prégnant dans les zones de développement ancien de sociétés sédentaires organisées (Chine, Europe, Moyen- et Extrême-Orient etc.). Dès lors, on pourrait préférer à la notion d'état de référence, celle de trajectoire évolutive propre à chaque système. L'identification de ruptures plus ou moins marquées dans cette évolution permettrait d'isoler les variables de forçage qui ont eu ou ont encore les impacts les plus forts, et ainsi d'affiner les politiques de protection /ou de mitigation. Dans cet esprit, la connaissance fine des changements environnementaux passés et de l'évolution des interactions homme-milieu (réaction des sociétés aux changements – dont climatiques – et changements environnementaux induits par les activités humaines) constitue un corpus de données de base indispensable.

_Les niveaux d'organisation : quels sont les objets d'étude et les réponses aux changements planétaires ?

Les recherches menées dans les sciences biologiques ont permis de mettre en évidence des réponses aux effets des changements planétaires à différentes échelles d'organisation de la diversité biologique. Ces réponses comprennent, pour ne citer que quelques exemples, des modifications au niveau des génomes et transcriptomes (ex. profil d'expression de gènes associés à des protéines de stress), des variations phénotypiques (ex. date de débourrement) ou morphologique (ex. taille), des déplacements d'espèces ou des modifications d'abondance dans les communautés, des modifications du fonctionnement des éco-

systèmes, de la structure des paysages... Une réponse, et variable, largement documentée dans de nombreux milieux est la modification de la diversité biologique telle que mesurée par les disparitions / apparitions d'espèces, sous l'effet des changements climatiques, d'usage des terres ou encore l'introduction d'espèces exotiques. L'Homme et les sociétés humaines ont un rôle particulier et original dans ce schéma, en étant à l'origine des changements (ils participent ainsi à la mise en œuvre des variables de forçage), mais aussi en en subissant leurs effets. Dans le courant de recherches actuelles sur la crise environnementale et la perte de la biodiversité, les études portant sur les micro- et macrorestes de paléovégétation montrent comment se génère la diversité biologique sur le temps long, quels sont les effets des changements climatiques sur la biodiversité et comment gérer les écosystèmes pour garantir leur qualité environnementale et la pérennité des ressources. Par exemple, la reconstitution de la diversité floristique dans le nord de l'Europe durant l'Holocène à partir des données polliniques suggère que si cette diversité est en lien avec les changements climatiques, elle est aussi plus forte lors de degré de perturbation anthropique intermédiaire sur la végétation comme par exemple durant des phases d'ouverture de paysage par l'homme. Il existe en particulier une relation positive entre la diversité floristique et les premiers stades d'utilisation des terres par les sociétés pré- et protohistoriques.

Les effets des changements planétaires ne se limitent pas à des soustractions ou à des additions d'espèces. Des effets en cascade, complexes à tous les niveaux, individus, populations, communautés, écosystèmes, paysages ont été mis en évidence.

Ils peuvent se traduire par des boucles de rétroaction entre les différents niveaux d'organisation. Un chantier de recherches doit impérativement être ouvert, qui viserait à l'identification des règles permettant de comprendre comment se fait **l'intégration des réponses** entre ces différents niveaux. Par exemple, les interactions entre espèces apparaissent comme d'importantes variables réponses pour comprendre le passage de la réponse des individus à celle de la communauté. Cependant les processus d'interactions spécifiques ou de co-évolution sont encore souvent étudiés par des approches favorisant l'étude des interactions binaires entre organismes (ex. proies-prédateurs), qu'il nous faut maintenant dépasser. En outre, un certain nombre de modèles conceptuels développés à partir d'expérimentations en conditions contrôlées doivent maintenant être testés en milieu naturel, y compris par la manipulation in situ d'un certain nombre de variables environnementales (dispositifs d'exclusion de pluie par exemple).

La **vitesse des réponses opérées par le vivant** est un large champ d'investigation, tel celui concernant la possibilité d'adaptation en

réponse à des changements planétaires rapides et de fortes amplitudes. L'évolution expérimentale utilisant des organismes à cycle très court a permis de montrer des capacités d'évolution contemporaine. La plasticité phénotypique, les relations génotype-phénotype, la variabilité interindividuelle et des traits d'histoire de vie (ex. phénologie) sont soulignées comme des axes majeurs de l'étude des réponses des organismes au changement planétaire. Les démonstrations empiriques restent cependant encore limitées. Les données muséographiques et les collections peuvent être des points de référence pour la période pré- et post-industrielle.

Il apparaît en outre que l'étude des réponses doit intégrer des processus et des modèles non linéaires dans lesquels les pas de temps des réponses des organismes vont de la seconde (ex. réaction métabolique) au million d'année (ex. spéciation). Cette préoccupation de la rythmicité et des échelles pertinentes (temps court vs. temps long) est également au centre des différentes disciplines concernées (sciences biologiques, sciences de la Terre et sciences humaines). L'existence de réponses couplées aux différents niveaux d'organisation du vivant va de pair avec l'intégration dans la réflexion scientifique de multiples échelles spatiales (bassins versants, régions et planète) et temporelles. Malgré de légères différences de définition, le concept de paysage semble être un cadre permettant le dialogue entre champs disciplinaires divers. La modélisation des changements climatiques s'est longtemps développée à l'échelle planétaire (ex. modélisation des circulations océaniques) alors même que les réponses des organismes se situent généralement à des échelles locales ou régionales.

La pertinence de tous les niveaux d'observation – gène, individu, population, communauté, écosystème, paysage, continent, planète – est ainsi indéniable. Les réponses biotiques aux changements planétaires doivent considérer de concert les processus écologiques et évolutifs, et ce, dans des cadres réalistes où la diversité des « acteurs » des changements planétaires est considérée : les réponses écosystémiques (amplitude, direction) variant selon le type de pression environnementale (ex. acidification, invasions biologiques, température etc.).

Finalement, la réflexion doit être articulée avec la thématique « Environnement-Santé », notamment pour des sujets tels que celui des maladies émergentes ou des contaminants.

_Action et perception des sociétés humaines

L'homme en tant qu'élément de forçage : les activités humaines ont eu et ont des impacts forts sur la planète. Les changements d'usage des terres sont apparus avec l'utilisation des ressources et principalement la sédentarisation des sociétés et l'apparition de l'agriculture et de l'élevage. Ces dernières se sont développées aux dépens des milieux naturels et particulièrement de la forêt. La déforestation a commencé il y a plus de 7000 ans en zone tempérée et se poursuit actuellement dans les zones tropicales. Elle a des impacts au niveau planétaire sur le bilan de carbone, l'érosion des sols, la perte de biodiversité. L'intensification de l'agriculture, dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle, a induit de

nombreux problèmes environnementaux liés à la contamination des sols et de l'eau par les engrais et les pesticides, à l'homogénéisation des paysages et entraînant une perte de biodiversité et une diminution des services écologiques rendus. L'utilisation massive d'énergie fossile et les émissions de gaz à effet de serre sont en grande partie responsables du réchauffement climatique dont les conséquences sur les aléas climatiques, l'adaptation et/ou le déplacement de la faune ou de la flore, les déplacements de populations humaines sont encore peu connus. Enfin l'urbanisation croissante, qui artificialise de plus en plus d'espace, est source de modifications microclimatiques et engendre une réorganisation dans les transports de personnes, de ressources, de déchets.

Perception des changements : Un anthroposystème est plus ou moins résilient en fonction de la technologie adoptée par les sociétés qui l'habitent. Il est maintenant démontré qu'en bien des lieux, des sociétés ont produit les risques dont d'autres ont hérité. Une des questions majeures réside dans l'approche du temps ou plutôt des temporalités différentes, relatives aux objets étudiés, mais aussi aux disciplines mises en œuvre. Les durées culturelles, politiques, sociales, juridiques, biophysiques, climatiques n'ont pas le même « temps d'existence ». De même, il existe différentes vitesses de changement des systèmes écologiques et culturels.

Les communautés de l'Arctique, par exemple, sont affectées par un changement économique et social sans précédent dû, notamment, aux changements climatiques circumpolaires abrupts et rapides, entraînant un englacement plus tardif, un dégel et une fonte des neiges plus précoces.

Ces changements ont des effets sur plusieurs composantes en relation avec les activités humaines, (1) la phénologie de différentes espèces animales et végétales, (2) la profondeur du dégel annuel du pergélisol ; cette dernière augmente, entraînant des glissements de terrain, et une déstabilisation des fondations des constructions, routes et pistes d'aviation. De même, la dégradation des zones arides et semi-arides apparaît comme le résultat de facteurs combinés climatiques et humains. Cette combinaison de plus en plus étroite entre les dynamiques naturelles et anthropiques est un dénominateur de plus en plus commun aux environnements de la planète. Si celle-ci est particulièrement visible et perceptible dans certaines régions (hautes latitudes, zones arides, ...), elle est prégnante dans la majorité des environnements planétaires.

Si les changements climatiques correspondent à un processus naturel bien connu dans l'histoire récente de la Terre, l'évolution en cours est unique pour ses effets sur une population humaine qui n'a jamais été aussi nombreuse et sur ses installations qui n'ont jamais occupé autant

de sites exposés aux possibles catastrophes naturelles. La réponse de ces sociétés doit être technologique, économique et sociale. Elle doit permettre de dégager les principales actions à engager pour aboutir à une mitigation des effets des changements planétaires.

Réflexion sur les outils et méthodes d'observation et d'étude des changements planétaires

Les recherches portant sur la réponse aux changements planétaires doivent pouvoir être conduites sur un *continuum* allant de l'observation à l'expérimentation, et intégrer des approches de modélisation (Fig. 1). Pour être performantes, ces recherches doivent également déboucher sur un accès mutualisé des données, gérées par des cyberinfrastructures comparables à celles utilisées en bioinformatique.

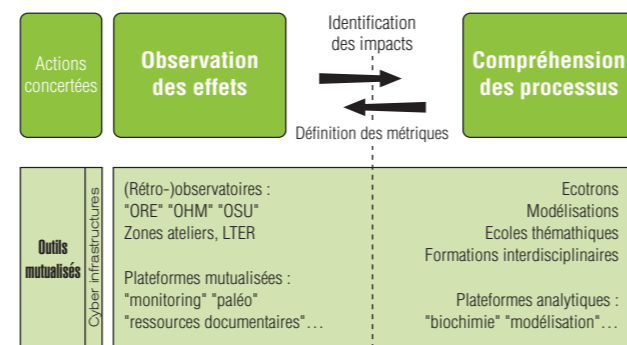


Figure 1. Les outils de la recherche sur les changements planétaires

Observation

Le CNRS dispose d'outils opérationnels permettant l'observation de nombreuses variables environnementales sur le terrain : Services d'observation de l'INSU (SO), Observatoires de Recherche en Environnement (ORE), Zones Ateliers (ZA) et Observatoires Homme Milieu (OHM). De nombreuses recherches sur les réponses aux changements planétaires sont menées au sein de ces structures, même si l'on doit constater qu'aucune n'est spécifiquement dédiée à cette question.

La plupart des ORE (26/34) sont consacrés à l'observation de paramètres physiques de l'évolution du globe, et ne couvrent donc pas l'ensemble du champ nécessaire pour aborder les réponses aux changements planétaires tels que décrits ci-dessus. Huit ORE prennent toutefois en compte les dimensions écologiques, biologiques et/ou sociétales au sein d'une démarche interdisciplinaire. Il est notable que d'autres ORE pourraient être utilisés pour fournir des variables d'entrée sur l'évolution de certains paramètres (hydrologie, climat, hydrogéologie, gaz à effets de serre, salinité de l'eau de mer etc.).

Les ZA affichent l'interdisciplinarité comme une valeur fondatrice de leur action. Structurées autour d'entités écologiques de taille régionale, elles représentent potentiellement un réseau de « têtes de pont » pour observer sur le terrain les réponses aux changements planétaires. Également à vocation interdisciplinaire, les OHM sont des structures locales, organisées autour de problématiques sociétales,

dans des contextes d'interaction forte avec l'environnement. Aucun des deux OHM actuellement mis en place n'est dédié spécifiquement aux questions liées aux changements planétaires. Ce concept, centré sur les effets socio-économiques « d'événements perturbateurs » est toutefois prometteur en termes d'intégration disciplinaire.

En ce qui concerne les approches rétrospectives (paléoenvironnement, archéologie, histoire), la communauté nationale est extrêmement visible en paléocéanographie et pour l'étude des carottes de glace, un peu moins en ce qui concerne les environnements continentaux de latitudes moyennes. Concernant cette dernière communauté, il existe une réelle dynamique et volonté de structuration qui bute néanmoins par le manque d'outils structurants communs et aussi de la reconnaissance de la valeur informationnelle des archives continentales. La question de l'accès aux outils de datations et le développement d'outils de mesure à haute résolution sont en particulier un frein au développement des recherches sur les environnements continentaux. Les travaux récents mettent en avant la pertinence des archives continentales dans les reconstitutions paléoclimatiques et paléoenvironnementales, notamment aux échelles de travail des sciences de l'environnement : celle des milieux et des territoires.

Expérimentation

Si la compréhension des processus peut passer par des expérimentations conduites *in situ*, menées dans des systèmes naturels (de l'organisme au paysage) en plus des tâches d'observation, la dissociation des effets des variables de forçage et la compréhension des interactions au sein de systèmes biologiques et écologiques complexes nécessitent le recours à des expérimentations dans des systèmes contrôlés. L'objectif est ici de manipuler les variables indépendamment les unes des autres, et de mesurer leurs effets de façon fine, notamment sur les compartiments où leur accès est difficile, voire impossible en milieu « naturel ». C'est en particulier le cas du sol et de l'interface plante-sol, encore considérés comme participant à la « la moitié cachée » des écosystèmes terrestres. L'INEE se doit donc de favoriser le développement de recherches concertées s'appuyant sur des outils d'expérimentation tels que les écotrons et des sites expérimentaux *in situ*. L'INEE doit aussi promouvoir l'expérimentation biologique sur des organismes « non conventionnels » d'intérêt écophysio-écologique (espèces autres que les modèles classiques que sont la souris, le poisson-zèbre, *coenorhabditis* ou *arabidopsis*... plus étudiés par l'Institut des Sciences Biologiques). Des plateformes pourront ainsi être mises en place être et/ou regroupées pour répondre aux besoins de la communauté.

Modélisation

Le défi de la **modélisation est de permettre** une meilleure connaissance et une meilleure compréhension des systèmes dynamiques complexes. Dans le cadre de l'étude des changements planétaires, elle doit s'appliquer à comprendre l'intégration des processus dans les systèmes complexes, et à articuler les connaissances aux différents ni-

veaux d'organisation. Pluridisciplinaire par excellence, la modélisation associe mathématiques, informatique, et les disciplines du domaine concerné. Un des objectifs assignés aux recherches visera l'instauration de nouvelles interactions entre ces disciplines.

Les systèmes complexes nécessitent des représentations mathématiques hétérogènes multimodèles, multiéchelles en temps et en espace, associées à des méthodes de résolution, d'assimilation de données (de nature et de qualité très variables, parfois peu fiables) et des outils de calcul très performants. Des approches stochastiques, ou mixtes stochastiques/déterministes, sont à développer.

La modélisation devra également être développée dans le cadre de la production et de l'évaluation de scénarii portant sur différents types et combinaisons de composantes des changements planétaires.

Gestion des données

Le volume et la complexité des informations nécessaires à la compréhension des processus en œuvre dans le cadre des changements planétaires nécessitent une approche fondamentalement intégrative. La communauté scientifique concernée commence seulement à formuler explicitement l'idée que le partage et l'intégration de l'information doivent devenir une de ses toutes premières priorités. Ici, l'objectif est de contribuer à surmonter la fragmentation et l'incompatibilité des informations pertinentes pour l'étude des changements planétaires afin de mieux les utiliser à une vaste échelle et entre disciplines. Il s'agit de développer une « écoinformatique », définie comme le champ de recherche aux interfaces entre l'écologie, les sciences informatiques et les sciences de l'information, et de l'étendre aux champs disciplinaires connexes. Ce vaste chantier conceptuel doit déboucher sur la constitution de cyberinfrastructures à même de répondre aux questions fondamentales et appliquées posées par l'étude des changements planétaires. Une révolution comparable à celle qui a débouché sur le développement de la bioinformatique il y a maintenant une vingtaine d'années doit être engagée rapidement dans le champ des sciences de l'environnement.

Les communautés concernées

Le cœur des recherches portant sur la réponse aux changements planétaires est réalisé par les communautés qui étudient :

- ▶ les sciences écologiques et de l'environnement : bioclimatologie, sciences du sol, géomorphologie, écophysio-écologie, écotoxicologie, écologie des communautés, des écosystèmes et des paysages, sciences de l'évolution, taxinomie, systématique, paléoenvironnement, paléoclimat, paléontologie... ;
- ▶ les sciences de l'homme et de la société : géographie, archéologie, histoire, sociologie, économie... ;

Au CNRS, cela concerne toutes les sections du Comité National rattachées à l'INEE, mais aussi certaines sections de l'INSU, de l'INSB et de l'INSHS.

Les partenariats avec les instituts ou autres établissements de recherche

Au sein du CNRS, les recherches sur les changements planétaires doivent être réfléchies en articulation avec :

- ▶ l'Institut National des Sciences de l'Univers : océans, échelle planétaire ; gestion des OSU ; à noter l'Atelier de Réflexion Prospective « Changements Environnementaux Planétaires » (ANR), piloté par l'INSU ;
- ▶ l'Institut des Sciences Biologiques : biologie et fonctionnement des organismes ;
- ▶ l'Institut des Sciences Humaines et Sociales : géographie, histoire, économie, sociologie

Au plan national, les autres organismes de recherches concernés par les études des changements planétaires incluent : l'INRA (en particulier les départements EFPA, EA, SPE, et la direction scientifique « Econat »), l'Ifremer, le Cemagref, le CIRAD, l'IRD, l'INRAP et certaines universités.

La Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité est aussi fortement concernée, dans la mesure où les changements planétaires en cours sont probablement la cause principale de la crise actuelle de la biodiversité.

Des partenariats avec les établissements publics de l'Etat à caractère administratif ayant pour vocation de financer, produire ou soutenir la recherche en environnement doivent également être envisagés. Par exemple : agences de l'eau, ONEMA, IGN, MétéoFrance. Il en est de même pour les gestionnaires d'espaces naturels et collectivités, tels que les parcs nationaux, les conservatoires du patrimoine naturel, les communes et les régions.

Les outils

L'ensemble des interventions durant cet atelier révèle trois champs où existe un réel manque de connaissance limitant de fait un traitement efficace des questions sur les changements planétaires : (1) la connaissance des trajectoires écologiques évolutives des systèmes soumis aux variables de forçage (préférée à la notion d'état initial, qui n'a pas de sens dans des systèmes évolutifs, souvent anthropisés de très longue date), (2) la hiérarchisation des variables de forçage sur les systèmes (ciblage des actions de remédiation ou mitigation) et (3) le manque de disponibilité des données, qu'il soit dû à une absence de renseignement sur les variables pertinentes ou à une dispersion des données dans des bases non accessibles et/ou non normalisées.

Les outils et actions déployés par l'INEE devront permettre de combler ces lacunes. Ce soutien devra concerner des actions de recherche menées dans deux directions : (1) observation et rétro-observation des effets des changements planétaires, et (2) compréhension des processus et des boucles de rétroaction associées aux changements

planétaires, qu'ils se produisent dans les systèmes écologiques ou humains (passés, en cours et à venir). Bien que dissociés pour des raisons opérationnelles, ces deux niveaux d'action sont intimement dépendants. L'objectif des observations est notamment d'identifier et de hiérarchiser les composantes des changements planétaires qui ont des impacts sur les systèmes. L'étude de ces processus conduira à l'identification de métriques pertinentes pour en observer les effets.

Il est entendu que ces actions porteront sur des objets d'étude qui peuvent être tout autant des systèmes naturels plus ou moins anthropisés que des systèmes sociétaux humains, ou toute combinaison interactive des deux (des anthroposystèmes complexes).

_Observation des réponses aux changements planétaires

La communauté scientifique insiste sur le manque criant de données d'observation des effets des changements planétaires. Pour combler ce manque, trois pistes doivent être suivies : (1) la mise en œuvre rapide d'un réseau de suivi écologique et environnemental (création et intégration de l'existant), (2) le recours à l'utilisation d'archives des conditions environnementales passées (rétro-observatoires) et (3) la mise à disposition et la mutualisation des données.

Les réseaux d'observation en environnement sont des dispositifs complexes et coûteux à mettre en œuvre et à maintenir, tant en termes d'investissements que de ressources humaines.

Une intégration au sein d'un réseau national (ORE, ZA, OHM) et international (LTER) paraît indispensable pour rationaliser l'effort de recherche public dans ce domaine. La communauté nationale doit se positionner dans ces réseaux, homogénéiser les protocoles d'acquisition de données y compris en regard des pays européens et faciliter l'accès aux données environnementales.

Dans un premier temps, il existe un réel besoin d'identifier quelles sont les actions déjà mises en œuvre susceptibles de répondre aux questions ici posées et de définir les métriques pertinentes à ajouter à cet existant. Il en est de même pour les variables réponses, par exemple la variabilité individuelle et les traits d'histoire de vie sont encore trop peu considérés dans les stratégies d'observation à long terme. De nouveaux outils de suivi peuvent également être proposés tels que des outils basés sur de nouvelles technologies (ex. génomique environnementale, télétransmission instantanée des données).

Sur la base de cet audit, il s'agira de décider de l'implantation d'un réseau national d'observatoires spécifiquement dédié à l'étude des réponses aux changements planétaires. Il est important de noter que cet effort d'observation doit s'accompagner d'un effort de type *démarche qualité* pour l'acquisition, la sauvegarde et la mise à disposition des données collectées. La constitution de bases de données et de systè-

mes d'information performants (sur des modèles comparables à ceux qui ont été développés en bioinformatique pour la biologie moléculaire), spatialisées et non spatialisées, est notamment ici un enjeu capital.

La notion de rétro-observatoire sous-entend l'utilisation d'archives naturelles (sédiments, spéléothèmes, bioindicateurs, cernes d'arbres etc.) ou humaines (archives historiques, archéologiques, mesures instrumentales), afin de combler le déficit de données sur des périodes de temps allant de la saison à plusieurs millénaires.

Ces rétro-observatoires devraient être associés au réseau d'observatoires de terrain. Ceci leur permettrait en effet, à la fois de bénéficier des données actuelles pour calibrer les marqueurs, et de fournir une continuité dans le temps long aux observations réalisées sur l'Actuel. Pour être efficaces, les rétro-observatoires devront pouvoir bénéficier de plateformes mutualisées spécifiques. Comme dans le cas des observatoires, ceci passe par la mutualisation des ressources existantes et par l'identification des ressources manquantes (notamment en termes de datations et de mesures à haute résolution). Une attention particulière pourra être portée au développement de nouveaux marqueurs à la croisée des différentes disciplines impliquées (biomarqueurs et ADN fossile, biogéochimie environnementale).

La notion de rétro-observatoire suppose également l'utilisation de données instrumentales préalablement acquises dans un but différent de celui qui nous intéresse ici. La question de la mise à disposition de ces données par des EPST (CNRS, INRA) et surtout par des EPA (IGN, Météo-France) se pose ici de manière cruciale. Des actions devraient être menées par l'InEE pour en favoriser l'accès.

Il est à noter que l'histoire de l'environnement, en tant que discipline, n'était pas représentée au colloque de prospective, ce qui a été maintes fois déploré. Pour cette communauté, des outils spécifiques (base de données, bases documentaires) existent certainement et pourraient être regroupées, ou au moins recensés, dans le cadre de l'InEE.

_Compréhension des processus associés aux changements planétaires

Les changements planétaires sont la résultante de deux types de forçages : les aspects démographiques qui modulent la pression anthropique, et les forçages directs (climat, pollutions, changement d'usage des terres, introductions d'espèces) qui impactent directement les systèmes. Passer de l'observation des effets sur des entités définies à la compréhension des processus à un niveau d'intégration supérieur nécessite un effort inédit en d'expérimentation *ex-situ* (écotrons) et de modélisation. Des tests de sensibilité menés sur des modèles analogiques ou

numériques pourront ensuite réorienter les tâches d'observation sur les métriques pertinentes.

La compréhension des processus de réponses des sociétés humaines aux changements planétaires suppose un investissement fort de la communauté SHS. L'archéologie, l'histoire ou la sociologie, qui ont des besoins instrumentaux particuliers, doivent clairement être intégrées dans les réflexions sur les outils. L'absence de représentants des deux dernières disciplines au séminaire n'a toutefois pas permis de dégager à ce jour de besoins particuliers.

Les priorités et pistes d'action

_Priorités et pistes d'action scientifiques

- ▶ identification des variables pertinentes permettant d'appréhender les différentes composantes des changements planétaires et leurs interactions ;
- ▶ prise en compte explicite de différents niveaux d'organisation des systèmes biologiques et humains ;
- ▶ développer une démarche fondée sur les services des écosystèmes, impliquant une approche fonctionnelle de la diversité biologique ;
- ▶ développement d'approches (empiriques, expérimentales, conceptuelles, théoriques) permettant de comprendre l'articulation entre différents niveaux d'organisation (ex. : gène-organisme, population-communauté ; systèmes écologiques-sociétés humaines) ;
- ▶ identifier les facteurs de risque émergents liés aux changements planétaires sur les éco- et anthropo-systèmes identifier les principaux facteurs permettant une mitigation des effets des changements planétaires ;
- ▶ utilisation critique des événements passés pour les projections de la réponse aux changements planétaires (reconnaissance de grandes différences dans la vitesse des processus, etc.) ;
- ▶ pour les tâches d'observation (rétrospectives et actuelles), nécessité de suivis à long terme ; prise en compte des kilomètres de coupes stratigraphiques mis au jour chaque année par les fouilles archéologiques préventives et programmées qui sont autant d'objets d'étude pour traiter des effets des changements climatiques ou des effets de l'agriculture sur l'érosion des sols ;
- ▶ pour les tâches d'expérimentation, prise en compte des variables pertinentes identifiées dans les tâches d'observation ; emphase sur les compartiments peu étudiés (sol, interface plante-sol) ; emphase sur les espèces modèles non conventionnelles ;
- ▶ homogénéisation et intégration des données issues des différentes disciplines concernées pour une diffusion et une utilisation larges ; développement d'une écoinformatique.

1 Réponses aux changements globaux

_Priorités et pistes d'actions méthodologiques

- ▶ développement et mise en oeuvre des outils de mesure en adéquation avec les variables permettant de décrire les changements planétaires ;
- ▶ stabiliser et coordonner les outils d'observations à long terme : ZA, ORE, OHM, rétro-observation ;
- ▶ se doter d'infrastructures performantes permettant des expérimentations sur les systèmes écologiques à différentes échelles (e.g. écotrons) ; animaleries pour expérimentations écophysiologiques, sites instrumentés... ;
- ▶ développer des plateformes analytiques mutualisées (grands instruments et mi-lourd) : une attention devra être portée au développement des plateformes sur les archives continentales ;
- ▶ transposer les outils de caractérisation du vivant (biochimie moléculaire) et de l'environnement (chimie, géochimie, biomarqueurs) à des études paléoenvironnementales pour prolonger les données d'observation dans le passé ;
- ▶ se doter de cyberinfrastructures permettant une gestion optimale et un large accès mutualisé aux données.

_Priorités et pistes d'actions institutionnelles

- ▶ coordonner les actions et les outils des différents instituts et organismes de recherche pour augmenter les capacités de recherche et éviter les recouvrements sans concertation ;
- ▶ faire pression sur les agences de financement de la recherche pour allonger les périodes de financements ;
- ▶ augmenter les appels à propositions de recherches ciblés sur les réponses aux changements planétaires, mais thématiquement ouverts et encourageant les passerelles disciplinaires.

2 Echelles temporelles et dynamique de la biodiversité

Rapporteur : Bruno David

Avec la collaboration de : Rachid Cheddadi, Denis Couvet, Gilles Escarguel, Philippe Janvier, Yvon Le Maho, Pascal Neige, Didier Néraudeau, Jean-Denis Vigne.

■ Le vaste champ de recherche portant sur la composition, l'histoire et la dynamique de la biodiversité, ainsi que sur les modalités et les mécanismes de son évolution, est à la base de notre capacité à comprendre la biosphère. Ces grandes questions ont été l'objet de plusieurs synthèses récentes comme l'illustrent le Focus sur la Biodiversité (2006, mais toujours d'actualité¹) ou les réflexions stratégiques de l'IFB (2008²) et de la FRB (2009³). Toutes ces synthèses soulignent que mieux cerner la dynamique de la biodiversité conditionne la compréhension des processus écologiques en cours. . Etre en position de répondre aux défis imposés par ce qu'il est désormais convenu d'appeler la 6^{ème} crise de la biodiversité requiert de maîtriser un corpus fondamental sur lequel ancrer des questionnements plus appliqués, directement tournés vers des questions sociétales. Or, nous sommes loin de disposer des bases conceptuelles nécessaires.

Aborder les questions énumérées ci-dessus suppose de savoir passer d'échelles très locales (cages à populations par exemple) à l'échelle globale, et parallèlement de pouvoir balayer des pas de temps très longs (au sens géologique) comme très courts (de l'ordre d'une génération brève). Réussir à intégrer ces échelles, à utiliser notre compréhension de processus fins (génétiques par exemple) pour mieux cerner le fonctionnement à grande échelle de la biosphère, à mobiliser notre connaissance du présent pour éclairer le passé et, inversement, sont de véritables enjeux. Mais cette quête n'est pas simple car l'extrapolation n'y est pas de mise. Des propriétés nouvelles émergent aux différents niveaux d'organisation; les paramètres mesurés pour le passé géologique sont difficiles à transcrire aux pas de temps courts (Purvis, 2008); les réactions de la biosphère aux grandes échelles spatiales ne sont pas réductibles à la somme d'événements locaux. La question du basculement d'échelles spatiales ou temporelles et de son incidence sur notre compréhension de la biosphère et de son

évolution est donc l'obstacle majeur à franchir (voir l'illustration récente qu'en donne Benton, 2009, à propos de l'évolution). Cet énoncé souligne d'emblée que la question est trop vaste et trop complexe pour pouvoir être traitée de manière exhaustive et qu'il est très difficile d'en avoir une vision synthétique réaliste. Des choix se sont donc imposés et les axes qui ont émergé de cet atelier indiquent les directions de recherche ayant semblé les mieux à même de combler quelques une de nos lacunes.

Restitution de l'atelier

L'ampleur de la tâche évoquée en introduction atteste qu'il aurait été illusoire d'attendre de la réunion prospective de Rennes une synthèse aboutie. Comme indiqué, nous avons donc retenu des axes pour le moment séparés, l'objectif étant de les faire se rapprocher via les initiatives que pourra avoir INEE au cours des prochaines années (écoles thématiques, ateliers, actions programmatiques...). Toutefois, nous avons également souhaité éviter un cloisonnement trop étroit entre les échelles. C'est pourquoi les paragraphes qui suivent ne font pas de distinction claire actuel – fossile, local – global, sans ou avec influence anthropique... Ils sont transversaux et il va sans dire que chaque sujet qui s'y prête doit être compris à toutes les échelles temporelles, spatiales systématiques ou organisationnelles pertinentes.

Les quatre grands axes de l'atelier : Evolution- Développement (Evo-Dévo) ; Fonctions / Adaptations ; Macroécologie ; Ecosystèmes / Environnements

Aucun des axes développés n'est spécifiquement consacré à l'évolution biologique ou à la biodiversité *per se*. Ce n'est pas pour autant que ces objets sont hors cadre, bien au contraire, ils sous-tendent la logique de la réflexion d'ensemble. En effet, explorer le monde biologique, que ce soit à partir d'organismes actuels ou fossiles, conduit à deux observations paradoxales : l'une exprime l'incroyable diversité de la forme des organismes, de leurs relations ou encore de leur patrimoine génétique, et l'autre reflète son évidente organisation. En d'autres termes le monde biologique est varié mais structuré. Depuis longtemps, et particulièrement depuis les travaux de Darwin, l'idée d'une transformation des êtres vivants s'est construite et permet désormais de concilier ces deux observations. Mais comprendre et explorer ce paradoxe nous impose une double analyse : celle du *pattern* évolutif (l'organisation apparente du monde biologique) et celle des mécanismes évolutifs (la mécanique sous-jacente qui façonne cette organisation). L'existence des

¹ Abbadie L., Bally R., Barbault R., Gouyon P.H., Renaud F. & Weber J. (2006). Focus La Biodiversité, CNRS éditi., 22pp.

² David B. (rédacteur) (2008). Réflexion stratégique de la commission scientifique de l'IFB.

³ Silvain J.F. (rédacteur) (2009). Prospective pour la recherche française en biodiversité, Fondation pour la recherche sur la biodiversité. (in press).

dinosaures ou des organismes énigmatiques du Cambrien de Burgess par exemple ne peut être prédite de l'analyse de la mécanique évolutive. En échange, trouver une logique à cette organisation ou comprendre pourquoi des populations d'insectes deviennent résistantes aux insecticides ne peut être déduite de leur simple observation et nécessite d'entrer dans la mécanique de l'évolution via un corpus théorique adapté. Cet aller-retour entre *pattern* et *process* évolutifs peut donc être vu comme une clé de lecture de la biodiversité actuelle ou passée, et permet également d'impliquer de nombreuses disciplines scientifiques (génétique, embryologie, phylogénie, paléontologie, écologie, ...). Parce qu'il est central dans l'existence et l'organisation de la biodiversité, le fait évolutif abordé sous ces deux aspects doit ainsi imprégner les recherches qui touchent à cette biodiversité. L'étude de l'évolution est donc au cœur des axes de cet atelier.

L'exploration de la biodiversité passe nécessairement par l'observation et le recensement des espèces qui constituent les différentes communautés. La compréhension de sa genèse nécessite d'étudier les mécanismes (comportementaux, écologiques, génétiques...) qui conduisent à la formation d'espèces nouvelles et sont encore bien loin d'être compris. La reconstruction de scénarios évolutifs intégrant l'apport des phylogénies, de la biogéographie, de la dynamique et de la génétique des populations est un autre élément de la compréhension de l'organisation de la biodiversité.

Sur ces bases, et notamment sur la distinction *process* vs *pattern*, l'exercice prospectif réalisé s'organise en quatre axes qui abordent successivement des questions qui touchent à la production de biodiversité, puis sa structuration.

- ▶ Ainsi le premier axe, positionné en amont, traite des questions d'émergence des phénotypes et de relations entre évolution et développement.
- ▶ Le deuxième axe se rapporte aux fonctions et aux adaptations, c'est-à-dire à la capacité des organismes à répondre aux changements et aux interactions.
- ▶ Les deux derniers axes concernent la structuration de la biodiversité abordée sous ses aspects macroécologiques, puis via les écosystèmes et leur relation à l'environnement.

Pourquoi ces choix ? On connaît de mieux en mieux certains processus (sélection, variabilité, expressions génétiques...), mais nos connaissances sur le passage du génotype au phénotype (axe 1) et la question de « l'adaptabilité » (axe 2) sont encore extrêmement fragmentaires. Par ailleurs, la compréhension des patterns requiert également de gros efforts (d'où les axes 3 et 4), notamment pour réussir à les lier aux processus sous-jacents.

Enfin, ces quatre axes se disposent le long d'un gradient de disciplines qui va d'interactions étroites avec les sciences de la Vie (INSB) à une interface explicite avec les sciences de l'univers (INSU) et, dans une moindre mesure, la chimie (INC). Les points d'arrimage aux sciences

de l'Homme (INSHS) sont distribués de manière plus diffuse, mais pas moins importante, dans les axes 2, 3 et surtout 4.

_Evolution-Développement (Evo-Dévo)

L'idée d'une relation entre le développement des individus, observable à l'échelle temporelle humaine, une hiérarchie des taxons actuels et une chronologie des organismes dans un temps géologique « long », est née dès le début du 19^{ème} siècle, sous l'influence d'embryologistes, de zoologistes et de paléontologues, fixistes pour la plupart, mais dont les travaux synthétisés sous la forme du « triple parallélisme » furent largement repris par Haeckel et Darwin dans une optique évolutionniste (voir par exemple Nelson & Platnick, 1980). Beaucoup de paléontologues et systématiciens ont été guidés par cette référence au développement des organismes actuels, souvent seul argument de polarisation des caractères face aux incertitudes de la phylogénie et de la mesure du temps géologique, mais presque ignoré par les fondateurs de la Théorie Synthétique. Elle ne fut remise à l'honneur que dans les années 1980, sous l'influence de S.J. Gould et avec les premières formalisations des hétérochronies du développement (Gould, 1977; Raff, 1996). C'est cependant avec la découverte des gènes « de développement » impliqués dans l'édification du plan d'organisation du phénotype, leur caractérisation et la possibilité d'en modifier les patrons d'expression, que cette relation évolution-développement a rapidement été à l'origine de la biologie du développement évolutionniste (*Evolutionary developmental biology*), ou « évo-dévo », actuellement en pleine diversification et que les puristes distinguent de la biologie évolutionniste du développement (*Developmental evolutionary biology*), ou « dévo-évo » (Hall, 2000). L'évo-dévo incorpore des données de l'embryologie causale, de la génétique formelle, mais aussi de la génétique moléculaire du développement et, occasionnellement, de la paléontologie et de l'écologie. Elle rejoint donc la génomique évolutive et s'incorpore à la Théorie Synthétique de l'évolution. L'évo-dévo est actuellement une nébuleuse thématique assez difficile à circonscrire, dans un contexte technologique en évolution très rapide, d'où une profusion de synthèses probablement prématurées (Raff, 1996; Hall, 1999; West-Eberhard, 2003; Müller & Newman, 2003; Carroll, 2005). Néanmoins, elle reste unifiée par la conception du rôle central du gène comme unité de transmission héréditaire et la traduction du génotype en phénotype, tout en considérant à sa juste mesure le rôle des processus épigénétiques dans le développement (Soshnikova & Duboule, 2009).

L'objet des recherches dans le domaine de l'évo-dévo est essentiellement de comprendre 1) l'origine et l'évolution du développement embryonnaire, 2) comment les modifications des processus développementaux génèrent des caractères nouveaux, 3) quelle est l'influence de la plasticité du développement sur l'évolution des traits d'histoire de vie, 4) quelle est l'influence de l'environnement sur le développement et 5) quelle est la base développementale de l'homoplasie et de l'homologie. Tous ces points contribuent à cerner comment se fait l'émergence des phénotypes et donc les modalités de production de biodiversité.

Toutes ces questions s'insèrent directement ou occasionnellement dans les thématiques de l'INEE (l'interface avec l'INSB est ici explicite et forte). Toutefois, il est probable que les progrès actuels de la génomique moléculaire expérimentale de l'évolution, couplée à la biologie systémique à l'échelle des lignées de cellules embryonnaires (Koentges, 2008), vont permettre d'élucider avec une précision croissante les processus impliqués dans les systèmes de régulation des gènes de développement et d'interpréter leurs expressions phénotypiques à partir de modèles. La biologie systémique se focalisera sur les « hotspots de flexibilité » des systèmes de régulation au niveau des innovations majeures qui actuellement structurent les principaux nœuds de l'arbre de la vie pluricellulaire (Koentges, 2008).

Le cadre phylogénétique imposé par la distribution la plus parcimonieuse des caractères (morphologiques ou non) présumés homologues et soutenu par un corpus conceptuel élaboré depuis trois décennies (Nelson & Platnick, 1980) reste donc à tester par l'analyse des réseaux de régulations impliqués dans le développement de quelques systèmes modèles que l'on pourra extrapoler à un grand nombre d'organismes actuels voire éteints (Koentges, 2008). On peut en espérer un test expérimental fiable de l'homologie, sous réserve que les modèles puissent aussi permettre d'expliquer les cas d'hétérotopie ou de cooptation de gènes qui participent du « bricolage » du développement (Duboule & Wilkins, 1998). Cette approche purement structurelle et mécanistique de l'émergence des innovations se doublera d'une approche fonctionnelle (ex : modularité et flexibilité des innovations en regard de la sélection naturelle) (Breuker et al., 2006).

Face à la complexité des mécanismes impliqués, même dans les événements développementaux les plus simples, on peut anticiper que l'évo-dévo, dont le but initial était de devenir une discipline fédératrice, deviendra en fait une discipline génératrice de voies de recherche autonomes, sans doute assez éloignée de son objet initial. On s'achemine probablement vers une ségrégation notable entre les différentes composantes fondatrices de l'évo-dévo en raison d'une évolution technologique nettement plus rapide dans certains domaines que dans d'autres, tandis que l'évolution conceptuelle de l'évo-dévo en général semble stagner. Les composantes non-expérimentales de l'évo-dévo, comme la paléontologie, devront certainement améliorer le niveau de résolution des données structurales (ultrastructures, conservations exceptionnelles) qu'il faudra confronter à celles issues des composantes expérimentales. Enfin, le principal problème à surmonter dans la communauté de l'évo-dévo, et que l'on constate dans toutes les réunions internationales, est celui de la diversité des concepts et des terminologies dans les disciplines qui la composent.

_Fonctions / Adaptations

La diversité biologique s'adapte et évolue en réponse aux variations à court terme et aux changements à long terme de l'environnement. Cette évidence a été constatée pour différentes époques du passé de la Terre. Au cours du Cénozoïque, le climat a connu une révolution fondamen-

tale liée à la mise en place et à la croissance des deux calottes polaires, mais également liée à la tectonique des plaques engendrant des modifications des circulations océanique et atmosphérique. Plus récemment, durant le Quaternaire récent, les cycles climatiques ont accentué les différences climatiques entre les pôles et l'équateur. Ces modifications ont engendré des spéciations et contraint les espèces animales et végétales à s'adapter ou à disparaître. Auparavant, les grands bouleversements qui avaient affecté la planète avaient été à l'origine des grandes crises de la biodiversité. Les exemples sont multiples.

Aujourd'hui, comprendre la dynamique de la biodiversité suppose que l'on connaisse les capacités d'adaptations des êtres vivants et de leurs assemblages aux changements. La connaissance de leurs limites biologiques exige une compréhension des mécanismes en jeu, qui demande d'utiliser une large gamme d'outils et de concepts des sciences de la vie *sensu lato*, de la physiologie moléculaire à l'écologie expérimentale, et d'associer les démarches et résultats obtenus *in vitro* et *in situ*. Ainsi, le suivi fin de la biodiversité en parallèle avec la mesure des changements environnementaux, associé à la connaissance de la flexibilité phénotypique (y compris comportementale) ou génétique, permettent de mettre en évidence et de comprendre les « effets-seuils » affectant par exemple l'établissement, la reproduction, ou la compétition, et aboutissant aux modifications locales de la diversité des organismes, des populations ou des communautés. Il faudra aussi savoir travailler sur les vitesses des processus engagés, particulièrement les dynamiques de migration, d'acclimatation ou d'évolution. L'ambition ainsi affichée couvre un champ thématique très large qui va des interactions durables entre organismes (symbioses s.l.), au comportement, à la physiologie et aux interactions génotype x environnement, tous ces aspects contribuant aux processus adaptatifs.

Il est maintenant admis que les symbiotes sont susceptibles d'influencer la biologie de leurs hôtes à tous les niveaux de l'organisation biologique (Combes, 1995). Elles jouent un rôle majeur dans le processus évolutif et dans les mécanismes d'adaptation des organismes. De plus, les interactions sont souvent multiples et s'emboîtent sur plusieurs niveaux (e.g. hyperparasitisme), générant des cycles complexes. On sait désormais aborder cette complexité des associations et les mécanismes qui les régulent et ainsi apprécier la valeur adaptative des processus impliqués.

L'écologie comportementale irrigue et fait désormais partie des sciences de l'évolution (Danchin et al., 2005). Les modifications du comportement et des traits d'histoire de vie sont des paramètres d'adaptation essentiels, souvent les premiers mis en œuvre face à un changement environnemental. Dans une approche fine des adaptations, on ne peut pas faire l'économie d'une compréhension des fonctions des comportements, notamment ceux impliqués dans l'exploitation des ressources, en les intégrant dans un cadre évolutif, par exemple en analysant leur impact sur le succès reproducteur des individus et des populations.

Depuis une dizaine d'années de nombreuses recherches tentent d'intégrer des données génétiques et environnementales pour mieux

comprendre comment les espèces se sont adaptées et utilisent des modèles prédictifs pour tester le degré de plasticité de leur adaptation (Cheddadi et al., 2009). Par exemple, au cours de la dernière période glaciaire l'isolement contraint des espèces durant plusieurs millénaires dans des zones refuges (Bennett et al., 1991) a abouti à des modifications génétiques que nous pouvons retrouver aujourd'hui dans l'ADN de nombreuses espèces. L'étude des refuges glaciaires et des migrations postglaciaires des espèces permet de préciser leur capacité de réponse aux variations environnementales et d'apporter ainsi des éléments concrets pour leur conservation à moyen et long terme. Plus près de nous, chaque espèce animale et végétale peut être considérée comme une innovation qui a remarquablement réussi dont nous avons beaucoup à apprendre de «comment elle fonctionne et dans quelles limites». Ainsi, la résistance exceptionnelle des insectes aux infections et la capacité des manchots à conserver intacte de la nourriture dans leur estomac ont permis de découvrir des peptides antimicrobiens et antifongiques qui sont notamment d'une grande efficacité contre les agents de maladies nosocomiales. Comprendre pourquoi à taille et métabolisme équivalent un oiseau vit jusqu'à 6 ou 7 fois plus longtemps qu'un mammifère pourrait également permettre de mieux comprendre les processus du vieillissement.

L'écologie évolutive ne peut donc rester descriptive. Pour progresser dans ses principaux questionnements, elle doit aujourd'hui devenir «mécanistique». Ne pas chercher à comprendre les mécanismes reviendrait seulement à garder une image statique de la biodiversité. Par exemple, ce n'est pas parce qu'on stockera sur disque dur N génomes entiers que l'on pourra en déduire la complexité des relations entre les organismes. Quand bien même nous construirions une base de données avec les informations génomiques plus les relations, d'autres questions dépasseraient ce cadre, par exemple comment tel organisme réagirait en présence de tel stress chimique ou climatique. C'est cet enjeu mécanistique qu'il faut aborder.

_Macroécologie

Dès la fin du 18^{ème} et le début du 19^{ème} siècle, des savants explorateurs comme von Humboldt (1828), ou un peu plus tard Darwin (1859) et Wallace (1878), avaient parfaitement perçu que, sur les continents comme dans les océans, les êtres vivants n'étaient distribués ni de façon homogène et uniforme, ni de manière aléatoire. De ce double constat, sont nées des disciplines comme l'écologie des communautés, la biogéographie et, plus récemment la macroécologie.

Des communautés locales à l'ensemble de l'écosphère en passant par les métacommunautés régionales et les provinces biogéographiques, quelles sont les parts respectives des processus fonctionnels (intrinsèquement déterministes) et historiques (de nature contingente), dans la mise en place, le contrôle et l'évolution des patrons de structuration géographique du vivant à ces différents niveaux d'intégration biogéographique ? Par quels mécanismes les paramètres physico-chimiques de l'environnement interviennent-ils dans l'organisation spatiale et

l'évolution temporelle de la biosphère, laquelle influence en retour bon nombre de caractéristiques physico-chimiques de notre planète ? Quelles sont les lois d'échelles d'espace et de temps sous-jacentes à ces actions, interactions et rétroactions ? Ces questions sont au centre des enjeux évoqués en introduction, à l'articulation entre processus observables, et relativement bien compris, et *patterns* plus globaux.

A petite échelle spatio-temporelle, l'écologie des communautés, en réduisant expérimentalement ou par la modélisation l'objet de son étude à ses composants élémentaires et aux déterminismes locaux de leurs interactions, ne peut accéder à tous les mécanismes responsables de la persistance et de la dynamique des communautés (Maurer 1999). A des échelles plus larges que celles dans lesquelles fonctionnent les organismes et les populations, des facteurs géographiques et historiques influencent durablement les relations entre les êtres vivants et l'environnement, et affectent *in fine* les patrons de distribution et de variabilité spatio-temporelle de la biodiversité (Ricklefs 2004).

Stimulantes par l'acuité des enjeux qu'elles dessinent, notamment en termes de protection et de conservation de la biodiversité (Brooks et al. 2006, Wilson et al. 2006), ces réflexions sont au cœur d'une discipline très active, mais encore étonnamment mal identifiée dans le paysage scientifique français : la macroécologie (Brown & Maurer 1989, Brown 1995, Rosenzweig 1995, Maurer 1999, Gaston & Blackburn 2000). En bref, la macroécologie consiste, à partir de l'analyse statistique des distributions de descripteurs biologiques et physico-chimiques (environnementaux) estimés pour un *grand* nombre d' « Unités Écologiques Opérationnelles » (organismes, populations, communautés, métacommunautés), en la *modélisation descriptive et inférentielle de motifs d'organisation éco-géographique, à des fins de compréhension des processus fonctionnels et historiques les ayant générés*. Dans cette problématique, le temps profond, géologique et évolutionnaire, de l'apparition, de l'évolution et de l'extinction des espèces, et donc de la constitution, de l'évolution et du démantèlement des associations d'espèces qui, localement, constituent les systèmes écologiques fonctionnels, ne peut être ignoré (Webb et al. 2002, Johnson & Stinchcombe 2007, Lieberman et al. 2007). De plusieurs ordres de grandeurs plus grand que le *temps biologique* – journalier à pluriannuel – de naissance, vie et mort des individus, ce *temps profond*, inaccessible à toute forme d'expérimentation – sinon *in silico* –, requiert une approche historique basée sur la description, la comparaison et la modélisation de données (paléo)biologiques ou phylogénétiques.

Au-delà des limites de pertinence (taxinomiques, phylogénétiques et taphonomiques, notamment) classiquement associées aux données, une double exigence méthodologique s'impose : l'information recueillie doit nécessairement être située géographiquement et temporellement. Cette exigence découle de la nature des objets et processus étudiés : des systèmes adaptatifs complexes dont les dynamiques non-linéaires nécessitent un traitement multi-échelles, seul en mesure d'identifier les réseaux d'interactions emboîtées (causalités ascendantes et descendantes) qui en régissent le fonctionnement (voir le texte de P. Bourguine,

L. Doyen & P. Huneman, dans le cadre de la présente prospective). Compte tenu de cette complexité, l'approche pluridisciplinaire fondée sur une dialectique réursive observation-reconstruction-simulation, offre des perspectives prometteuses : par l'analyse couplée ou séparée de données actuelles, archéologiques, et paléontologiques, identifier les paramètres et mécanismes génériques contrôlant les dynamiques spatiales et temporelles des patrons de distribution géographique de la biodiversité (e.g. gradients latitudinaux de richesse taxinomique ; Brayard et al. 2005, Rangel et al. 2007, Escarguel et al. 2008a). Dans ce contexte, un apport non négligeable des données archéologiques et paléontologiques est d'améliorer la validation des modèles reconstruits, notamment en terme de réalisme des paramètres (conditions aux limites de nombreux paramètres non directement observables/expérimentables dans la nature actuelle).

Une telle approche combinant l'observation à différentes échelles d'espace et de temps et la reconstruction de modèles de simulations numériques, qu'ils soient déterministes ou stochastiques, est de nature à préciser de nombreux points actuellement en discussion. En effet, un modèle de simulation peut, dans la plupart des cas, être conçu comme un générateur d'hypothèses neutres (*sensu* Gotelli & McGill 2006), hypothèses pouvant être directement confrontées aux données empiriques, pour être finalement conservées ou écartées. C'est par exemple le cas des questions suivantes, toujours largement ouvertes :

- ▶ Au sein d'une aire géographique donnée, quels sont les rythmes, paramètres de contrôle et mécanismes de l'évolution des diversités α , β et γ (Loreau 2000, Koleff & Gaston 2002, Davis 2005, Maridet et al. 2007, Escarguel et al. 2008b) ?
- ▶ Les assemblages taxinomiques que constituent les communautés locales sont-ils des sous-ensembles aléatoires des métacommunautés régionales (Morton & Law 1997, Gotelli & McCabe 2002, Hubbell 2001, 2005, Chase 2005) ?
- ▶ Comment l'histoire phylogénétique et biogéographique façonne les propriétés structurelles et fonctionnelles des communautés et métacommunautés (Webb et al. 2002, Ricklefs 2006, Johnson & Stinchcombe 2007, Lieberman et al. 2007) ?
- ▶ Comment répondent les communautés aux changements globaux, et plus précisément leurs propriétés fonctionnelles ? Quelles sont les conséquences de la diminution de leur taux de spécialisation (Julliard et al. 2006) ?

_Ecosystèmes / Environnements

Ce quatrième axe est celui qui présente les interfaces les plus fortes et les plus diverses : 1) en premier lieu avec l'INSU pour tout ce qui relève de l'environnement sous ses aspects physico-chimiques et d'une manière plus générale ce qui touche aux relations biosphère-géosphère ; 2) en second lieu avec l'INSHS pour aborder les interactions entre les pratiques humaines (c'est-à-dire les systèmes techniques dans leur environnement social, économique, cognitif et symbolique) et les

écosystèmes qu'elles affectent ou sont susceptible d'affecter.

Le premier point aborde la manière dont la dynamique de la biodiversité est modulée, voire perturbée, par des modifications des paramètres globaux (changements climatiques, tectonique des plaques, événements volcaniques...) ou plus locaux (hygrométrie, modifications des lignes de rivage, courants marins...). Sous ses aspects purement écologiques et environnementaux, il peut être traité au niveau des paléoécosystèmes comme des systèmes naturels actuels (Thuiller et al., 2005) et plusieurs questionnements de cet ordre ont été évoqués dans les axes 2 et 3 et le sont dans différents exercices de prospective comme celle menée en commun avec l'INSU sur les surfaces et interfaces continentales. Dans les lignes qui suivent, l'accent a donc plus été mis sur le second point qui rejoint par ailleurs les préoccupations des ateliers 3 et 1.

Les interactions entre l'environnement, les écosystèmes et les sociétés peuvent se situer à différents niveaux spatiaux et temporels. Cependant, quelle que soit leur échelle, elles sont soumises à différents forçages. La composition et le fonctionnement d'un écosystème à un instant donné intègre et dépend inévitablement d'interactions avec d'autres éléments ayant eu lieu dans un passé plus ou moins lointain (on retrouve là une interface entre échelles). Ainsi, un changement environnemental abrupt peut avoir un impact local fort, parfois destructeur, sur une population ou un écosystème. La résilience qui le suit peut être plus ou moins rapide selon le système concerné et son degré d'organisation. Mais les changements à long terme (plusieurs siècles ou millénaires) ont des impacts bien plus profonds sur les écosystèmes y compris sur la diversité génétique des espèces qui les composent. Par exemple, les changements climatiques du Quaternaire ont contraint les écosystèmes à des modifications profondes, certaines espèces disparaissant, d'autres occupant des espaces bien plus étendus (Cheddadi et al., 2005). Ces changements naturels ont également affecté de façon indélébile la diversité génétique des espèces (Hewitt, 2000; Petit et al., 2003). La connaissance de l'histoire à travers des enregistrements fossiles ou instrumentaux et/ou son suivi (pour la période contemporaine) apparaissent donc fondamentaux pour comprendre le fonctionnement des systèmes écologiques, anthropisés ou non, et aller vers une meilleure gestion et préservation de la biodiversité (Taberlet et Cheddadi, 2002; Willis & Birks, 2006; Petit et al., 2008).

Depuis le début de notre interglaciaire, avec l'émergence des sociétés agro-pastorales, il y a environ 11500 ans, les activités des sociétés humaines ont commencé à jouer un rôle significatif qui a marqué l'environnement d'une empreinte plus ou moins localisée et intense. Dans de nombreuses régions du monde, l'impact anthropique devient de premier ordre dès la fin du Néolithique, il y a 4000 à 2000 ans, occultant plus ou moins nettement les effets climatiques. Cette nouvelle donne représente un événement environnemental majeur à l'échelle du Quaternaire, voire à celle des temps géologiques. Il n'est pas concevable de chercher à comprendre la dynamique des environnements et de la biodiversité actuelle sans se soucier d'élucider les processus en

œuvre dans la mise en place et l'évolution de ces nouveaux environnements anthropisés, voire anthropiques (agrosystèmes). Pourtant, jusqu'aux dernières années du 20^{ème} siècle, de telles recherches sont restées anecdotiques faute d'un cadre conceptuel suffisamment solide pour briser les cloisons disciplinaires (Zeder 2009). En effet, l'analyse de l'émergence et l'évolution des sociétés agro-pastorales restaient pour l'essentiel la préoccupation de l'anthropologie préhistorique à historique, alors que l'évolution des environnements de la fin du Tardiglaciaire ou du début de l'Holocène était principalement vue sous l'angle paléoclimatique. Il est désormais essentiel de lier ces domaines dans une perception systémique intégrant conjointement les systèmes culturels, les écosystèmes et leurs interactions (Pascal et al. 2006), qu'on peut exprimer en termes de co-évolution et de résilience réciproque. La construction de ce cadre contextuel, tout comme la naissance et la pérennisation des compétences scientifiques d'interfaces susceptibles de nourrir ces recherches représentent un enjeu majeur au plan international. Grâce au développement précoce et volontariste de l'archéologie environnementale, la communauté française est bien armée pour relever ce défi, notamment au sein de l'INEE.

Plus récemment, le début de la période industrielle a marqué une nouvelle étape. Depuis environ 150 ans, nous enregistrons dans l'atmosphère une augmentation des gaz à effet de serre. Outre leur implication dans les changements des températures à l'échelle globale ou non, leur augmentation à elle seule a un impact sur la physiologie, la phénologie et le fonctionnement des écosystèmes. Pour l'Afrique par exemple, une modélisation a montré qu'un changement du taux de CO₂ atmosphérique peut générer un remplacement de la forêt tropicale de montagne par un biome arbustif (Jolly & Haxeltine, 1997). La relation écosystème-environnement-sociétés humaines actuelle est très complexe et requiert des données de plus en plus précises à tous les niveaux organisationnels et une modélisation intégrant de plus en plus de processus dans un contexte de changement extrêmement rapide (les prédictions de l'IPCC sont en train de se confirmer). A titre d'analogie du passé, le dernier réchauffement climatique global de plusieurs degrés que la planète a connu date de 11000 ans. Ce réchauffement ancien a modifié substantiellement la composition des écosystèmes au niveau de la planète. Plusieurs études phylogéographiques ont montré l'impact de l'environnement sur les espèces animales (Taberlet, 1998; Avise, 2009) et végétales (Petit *et al.*, 2002). L'ensemble de ces données révèle des situations et des histoires très différentes entre les zones tempérées, subtropicales et tropicales, avec d'importantes implications en termes de conservation. Ces modifications ont été enregistrées et peuvent être reconstituées au niveau spécifique, écosystémique, des paysages, des continents jusqu'au niveau global. Bien que cette situation ancienne ne soit pas totalement équivalente au réchauffement attendu son apport est fondamental pour une meilleure compréhension du couple écosystème-environnement.

La Complexité

La complexité est une caractéristique inhérente d'un système qui comporte plusieurs éléments, mais qui n'est pas réductible à la somme de ses éléments. La connaissance détaillée de tous les éléments ne suffit donc pas à comprendre le système dans son ensemble. Biodiversité et évolution, au cœur des quatre axes évoqués, sont donc par nature des objets éminemment complexes puisqu'ils sont régis par de nombreux processus interagissant à des échelles diverses. Pour les champs considérés dans les quatre axes retenus, la complexité est d'abord propre à chacun d'eux: interactions, réticulations, emboîtements, rétroactions, boucles interdépendantes... autant de caractéristiques familières, mais pour autant difficiles à appréhender et à intégrer dans une vision synthétique. Mais, face aux enjeux posés en introduction, la complexité se manifeste de manière encore plus prégnante dans l'interfaçage des échelles de temps et d'espace, comme dans les niveaux d'approche. Les avancées seront disciplinaires (génétique, biologie du développement, physiologie, écologie, archéologie, paléontologie, etc.), interdisciplinaires (au croisement des disciplines sus citées), mais elles viendront aussi d'autres domaines tels que l'informatique (bioinformatique) ou les mathématiques (modélisation) qui contribueront à résoudre cette complexité. C'est ce dernier point qui est plus spécialement développé ci-après.

La connaissance de la dynamique de la biodiversité a une application majeure, la modélisation de scénarios. L'ambition de ces scénarios n'est pas tant de fournir des prévisions, mais plutôt de proposer une gamme de possibilités futures à comparer. Leur construction rigoureuse nécessite un effort majeur dans le domaine de la modélisation.

Il s'agit de construire des modèles intégrés, pertinents pour les disciplines concernées (écologie, économie, climat, ...). Cette démarche mobilise les modèles de dynamique de la diversité biologique, les domaines de l'écologie évolutive et l'écologie fonctionnelle, les modèles socio-économiques (accès bien public, occupation des sols, croissance et investissement, ...), la bio-économie, et l'économie de l'environnement. Dans un premier temps, ces scénarios doivent se développer à partir de scénarios climatiques, d'usage des sols et d'exploitation des ressources naturelles, avec la perspective d'interagir avec ces autres scénarios.

Une telle modélisation impose d'identifier les processus majeurs en jeu, les mécanismes et réponses fonctionnelles entre la biodiversité

(traits de vie, ...), les pressions anthropiques (occupation des sols en agriculture, efforts de pêche, ...) et les changements climatiques. Elle impose ensuite de construire les modèles adéquats, prenant en compte les processus choisis, déterminer ceux qui peuvent être écartés, les aléas que l'on peut négliger, les niveaux d'intégration pour lesquels on ne prend pas en compte la diversité des entités ou des processus. Ces choix se déterminent à la lumière des mesures, données et dynamiques passées, de quantifications. En effet, des méthodes quantitatives sont requises pour mesurer, évaluer, comparer les scénarios. Les méthodes de statistique, bio-statistique et d'économétrie sont nécessaires. Elles doivent aussi permettre d'évaluer les incertitudes portant sur les dynamiques et les pressions socio-économiques.

Une difficulté de cette modélisation pluridisciplinaire est le couplage entre processus se plaçant à des pas de temps différents. Les rythmes temporels pouvant varier selon la nature des mécanismes, temps long en socio-anthropologie, temps moyen à long, voire très long en écologie évolutive (selon les organismes considérés, le poids des processus évolutifs, s'agit-il de dynamique des populations ou d'évolution des communautés ?), temps court en économie. Le couplage entre des processus opérant à des pas de temps différents peut générer des processus émergents, de basculement des écosystèmes dans d'autres domaines de stabilité. Il s'agit donc d'un enjeu scientifique majeur, de grand intérêt conceptuel, mathématique et social.

Les communautés concernées

Par essence, la thématique de l'atelier était très large et à même d'intéresser des communautés scientifiques aussi diverses que celles des paléontologues, préhistoriens, archéozoologues, écologistes, généticiens, économistes, sociologues, modélisateurs... De nombreuses équipes rattachées à INEE ont donc été impliquées dans la réflexion élaborée à Rennes, mais aussi des équipes tournées vers l'INSU, l'INSHS, l'INSB ou l'INC. On ne pourra avancer que si la réflexion est d'emblée pluri- et inter-disciplinaire.

La France est particulièrement bien positionnée pour les différents aspects qui touchent aux quatre axes mis en avant par cet atelier, ce qui est d'ailleurs en cohérence avec le choix de ces axes.

Au cœur des sciences du développement (Evo/dévo, axe 1) on trouve les laboratoires de l'INSB comme ceux de l'université de Strasbourg ou de l'ENS-Lyon. Mais, bien que de manière différente, plusieurs équipes INEE contribuent également aux recherches en évo/dévo : au MNHN, à Gif/Yvette ou à Dijon par exemple où les recherches portent sur variabilité, stabilité ou modularité du développement. Un signe de cette implication est, qu'après ceux de Prague et de Gand, le troisième colloque européen d'évo/dévo qui rassemble bien au delà des frontières de l'Europe se tiendra à Paris en juillet 2010.

Fonction / Adaptations (axe 2). Tout ce qui touche à l'écophysiologie (à Strasbourg, Chizé, Lyon...), à l'écologie comportementale (Toulouse,

Montpellier, Dijon, Rennes...), ou aux interactions entre organismes (symbioses) (Perpignan, Poitiers...) s'inscrit dans une démarche de biologie intégrative qui correspond à un courant d'idées particulièrement porteur qui dépasse le contexte national. Les équipes françaises contribuent de manière significative à cette dynamique.

La macroécologie (axe 3) est une discipline en émergence récente. Dans ce domaine, les équipes françaises sont encore peu structurées et ce sont principalement des chercheurs dispersés – mais interagissant – qui contribuent à la progression des connaissances (notamment en paléo-macroécologie). Toutefois, la structuration engagée sous la houlette de la FRB pour construire un projet national autour de la modélisation de la biodiversité s'inscrit complètement dans cette mouvance. On devrait donc voir à brève échéance émerger un dispositif original, au service de toute la communauté, qui devrait tout à la fois concerner des dimensions fondamentales et appliquées. Une telle initiative n'a, à ce jour, pas d'équivalent.

Ecosystèmes / Environnements (axe 4). Il existe une tradition hexagonale très forte dans ce domaine, tant en domaine continental qu'en domaine marin, tant pour les animaux que pour les végétaux ou pour les micro-organismes (tous les règnes du vivant sont concernés). La structuration en laboratoires bien visibles est donc bien ancrée (voir, parmi d'autres, les équipes de Montpellier, Lyon, Paris, Marseille, Rennes, les stations marines...). A noter, de manière originale, un très bon positionnement français pour les périodes sous influence anthropique ancienne (équipes INEE du MNHN ou de l'université de Franche-Comté par exemple).

Partenariats avec les autres instituts ou d'autres établissements de recherche

Au sein du CNRS, on retrouve pour cet atelier les principaux partenaires naturels d'INEE à savoir l'INSU (notamment pour ce qui se rapporte au temps profond), l'INSHS (pour ce qui touche aux sociétés humaines, y compris anciennes) et l'INSB (en particulier pour ce qui concerne le développement des organismes et leur physiologie). En élargissant le cercle, outre de nombreuses universités, le contenu scientifique de l'atelier a des prolongements dans les thématiques développées à l'INRA (développement des plantes, agroécologie, diversité des cultivars...), ou partage des objets d'études avec l'IFREMER (domaine marin), l'IRD ou le CIRAD (outre-mer). Les interfaces entre la communauté INEE impliquée dans cet atelier et les organismes sus-cités se traduisent par des collaborations inter-équipes ainsi que par des structurations transversales, à plus grande échelle, de type fédérations de recherche, GIS...

Outils, priorités et pistes d'actions

Suggérer une mise en œuvre opérationnelle pour un champ aussi vaste et divers que celui balayé par les quatre axes qui précèdent est une gageure. Elle peut se présenter néanmoins sous des intitulés complémentaires.

Avoir la capacité d'acquiescer et de gérer les données est le point focal des moyens requis. Cet aspect met en regard les actions requises avec les outils nécessaires pour les accomplir. D'un côté, définition, acquisition, organisation, validation, archivage, et distribution des données. De l'autre nécessité de disposer de moyens et d'outils pour le terrain, les observatoires, les suivis temporels, les bases de données, les collections et les sites d'accès. Faire face à cette énumération, c'est répondre à un besoin central qui concerne toutes nos disciplines (paléontologie, archéozoologie, écologie...) et toutes les échelles. Cela revient à mettre en place une structure qui s'apparente à un instrument national, mais qui fonctionne de manière distribuée sous pilotage INEE (voir atelier 9).

Le deuxième point concerne les techniques et instruments nécessaires: plates-formes de séquençage, accès aux synchrotrons (la ligne IPANEMA de Soleil peut répondre à ce besoin), μ CT, spectrométrie, morphométrie... autant d'instruments de type mi-lourd qui pourraient être mis à disposition de la collectivité INEE concernée.

Au côté des plates-formes analytiques, il s'agit aussi de promouvoir les plates-formes expérimentales. Ces dispositifs permettent d'effectuer des expérimentations *in* ou *ex situ* en conditions contrôlées afin d'étudier les réponses des organismes, populations ou communautés aux perturbations environnementales. Dans le domaine de la diversité ces dispositifs peuvent contribuer à analyser les relations entre diversité et fonctions des systèmes écologiques tout comme à vérifier des hypothèses ou des scénarios concernant les effets des changements environnementaux sur la composition, la structure et les fonctions des assemblages d'organismes.

Le dernier point touche à l'animation et à la formation. Elles pourront aisément se faire via l'organisation d'ateliers ou d'écoles thématiques qui s'avèrent pertinentes pour répondre au besoins de croisements interdisciplinaires nécessaires, y compris pour des questions d'harmonisation des langages et des concepts, notamment pour l'axe 1 Evo/dévo et plus généralement pour harmoniser/élargir la notion même de biodiversité, les différentes communautés concernées l'utilisant de manière quelquefois divergente (e.g. relier le passé au présent).

Enfin, ces moyens matériels ou techniques resteront peu utiles s'ils ne sont pas accompagnés par un réel effort en moyens humains; inutile de rappeler ici les requêtes qui remontent des équipes !

Références :

- Avisé J.C. (2009). Phylogeography: retrospect and prospect. *Journal of Biogeography*, 36: 3-15.
- Bennett K.D., Tzedakis P.C., Willis K.J. (1991). Quaternary refugia of north European trees. *Journal of Biogeography*, 18: 103-115.
- Benton M. (2009). The Red Queen and the Court Jester: species diversity and the role of biotic and abiotic factors through time. *Science* 323 : 728-732.
- Brayard A., Escarguel G. & Bucher H. (2005). Latitudinal gradient of taxonomic richness: combined outcome of temperature and geographic mid-domains effects? *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research* 43, 178-188.
- Breuker C. J., Debat V. & Klingenberg C.P. (2006). Functional evo-devo. *TREE* 214, 88-492
- Brooks T.M., Mittermeier R.A., da Fonseca G.A.B., Gerlach J., Hoffmann M., Lamoreux J.F., Mittermeier C.G., Pilgrim J.D. & Rodrigues A.S.L. (2006). Global Biodiversity conservation priorities. *Science* 313, 58-61.
- Brown J.H. & Maurer B.A., 1989. Macroecology: the division of food and space among species on continents. *Science* 243, 1145-1150.
- Brown J.H. (1995). *Macroecology*. University of Chicago Press, Chicago.
- Carroll, S.B. (2005). Endless forms most beautiful: The new science of evo-devo and the making of the animal kingdom. Norton.
- Chase J.M. (2005). Towards a really unified theory for metacommunities. *Functional Ecology* 19, 182-186.
- Cheddadi R., Beaulieu J.L., Jouzel J., Andrieu-Ponel V., Laurent J.M., Reille M., Raynaud D. & Bar-Hen A. (2005). Similarity of vegetation dynamics during interglacial periods. *PNAS*, 12 (39): 13939-13943.
- Cheddadi R., Fady B., François L., Hajar, L., Suc J.P., Huang K. Demarteau M., Vendramin G.G. & Ortu E. (2009). Putative glacial refugia of *Cedrus atlantica* from Quaternary pollen records and modern genetic diversity. *Journal of Biogeography*, 36: 1361-1371.
- Combes C. 1995. *Interactions durables. Ecologie et évolution du parasitisme*. Masson, Paris.
- Danchin E.; Giraldeau L.A. & Cézilly F. (eds) (2005). *Ecologie comportementale*. Dunod, Paris.
- Darwin C. (1859). *The origin of species by means of natural selection*. J. Murray, London.
- Davis E.B. (2005). Mammalian beta diversity in the Great Basin, western USA: palaeontological data suggest deep origin of modern macroecological structure. *Global Ecology and Biogeography* 14, 479-490.
- Duboule, D. & Wilkins, A.S. (1998). The evolution of 'bricolage'. *TIG* 14, 54-59.
- Escarguel G., Brayard A. & Bucher H. (2008). Evolutionary rates do not drive latitudinal diversity gradients. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research* 46, 82-86.
- Escarguel G., Legendre S. & Sigé B. (2008). Unearthing deep-time biodiversity changes: the Palaeogene mammalian metacommunity of the Quercy and Limagne area (Massif Central, France). *Comptes-Rendus Géoscience* 340, 602-614.
- Gaston K.J. & Blackburn T.M. (2000). *Pattern and process in Macroecology*. Blackwell Science.

- Gotelli N.J. & McCabe D.J. (2002). Species co-occurrence: a meta-analysis of J. M. Diamond's assembly rules model. *Ecology* 83, 2091-2096.
- Gotelli N.J. & McGill B.J. (2006). Null versus neutral models: what's the difference? *Ecography* 29, 793-800.
- Gould S. J. (1977). *Ontogeny and Phylogeny*. Harvard University Press, Cambridge
- Hall, B.K. (1999). *Evolutionary developmental biology*. Springer.
- Hall, B.K. (2000). Evo-devo or devo-evo – Does it matter? *Evol. Dev.* 2, 177-178.
- Hewitt, G. 2000. The genetic legacy of the Quaternary ice ages. *Nature*, 405: 907- 913.
- Hubbell S.P. (2001). *The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography*. Princeton University Press, Monographs in Population Biology n° 32.
- Hubbell S.P. (2005). Neutral theory in community ecology and the hypothesis of functional equivalence. *Functional Ecology* 19, 166-172.
- Johnson M.T.J. & Stinchcombe J.R. (2007). An emerging synthesis between community ecology and evolutionary biology. *Trends in Ecology and Evolution* 22, 250-257.
- Jolly, D. & Haxeltine, H. (1997). Effect of Low Glacial Atmospheric CO2 on Tropical African Montane Vegetation. *Science*, 276: 786 – 788
- Julliard, R., Clavel, J., Devictor, V., Jiguet, F. and Couvet, D. (2006). Spatial segregation of specialists and generalists in bird communities. *Ecology Letters* 9, 1237-1244
- Koentges G. (2008). Evolution of anatomy and gene control. *Nature* 451: 658-663.
- Koleff P. & Gaston K.J. (2002). The relationships between local and regional species richness and spatial turnover. *Global Ecology and Biogeography* 11, 363-375.
- Lieberman B.S., Miller III W. & Eldredge N. (2007). Paleontological patterns, macroecological dynamics and the Evolutionary process. *Evolutionary Biology* 34, 28-48.
- Loreau M. (2000). Are communities saturated? On the relationship between a, b and g diversity. *Ecology Letters* 3, 73-76.
- Maridet O., Escarguel G., Costeur L., Mein P., Huguency M. & Legendre S. (2007). Small Mammals (rodents and lagomorphs) European Biogeography from the Upper Oligocene to the mid Pliocene. *Global Ecology and Biogeography* 16, 529-544.
- Maurer B.A. (1999). *Untangling ecological complexity: the macroscopic perspective*. University of Chicago Press, Chicago.
- Minelli, A. (2003). *The development of animal form: Ontogeny, Morphology and Evolution*. Cambridge Univ. Press.
- Morton R.D. & Law R. (1997). Regional species pools and the assembly of local ecological communities. *Journal of Theoretical Biology* 187, 321-331.
- Müller G.B. & Newman S.A. (eds) (2003). *Origination of organismal form: Beyond the gene in developmental and evolutionary biology*. MIT Press.
- Nelson, G. & Platnick, N. (1980). *Systematics and Biogeography. Cladistics and vicariance*. Columbia Univ. Press.
- Pascal M., Lorvelec O. et Vigne J.-D. (2006). Invasions biologiques et extinctions. 11 000 ans d'histoire des vertébrés en France. Paris : Belin. 350 p.
- Petit R.J., Hu F.S. & Dick C.W. (2008). Forests of the Past: A Window to Future Changes. *Science* 320: 1450-1452.
- Petit R.J., Aguinagalde I., Beaulieu J.L., Bittkau C., Brewer S., Cheddadi R., Ennos R. Fineschi S. Grivet D., Lascoux M., Mohanty A., Muller-Starck G., Demesure-Musch B., Palmé A., Pedro Marti J., Rendell S., Vendramin G.G. (2003). Glacial refugia: hotspots but not melting pots of genetic diversity. *Science*, 300: 1563-1565.
- Purvis A. (2008). Phylogenetic approaches to the study of extinction. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 39: 301-319.
- Raff R.A. (1996). *The shape of Life: Genes, developments, and the evolution of animal form*. Chicago Univ. Press.
- Rangel T.F.L.V.B., Diniz-Filho J.A.F. & Colwell R.K. (2007). Species richness and evolutionary niche dynamics: a spatial pattern-oriented simulation experiment. *The American Naturalist* 170, 602-616.
- Ricklefs R.E. (2004). A comprehensive framework for global patterns in biodiversity. *Ecology Letters* 7, 1-15.
- Ricklefs R.E. (2006). Evolutionary diversification and the origin of the diversity-environment relationship. *Ecology* 87(suppl.), 3-13.
- Rosenzweig M.L. (1995). *Species diversity in space and time*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Soshnikova N. & Duboule, D. (2009). Epigenetic control of mouse Hox genes in vivo. *Science* 5932, 1320-1323.
- Taberlet, P. et Cheddadi, R. (2002). Quaternary refugia and persistence of biodiversity. *Science*, vol. 297 (5589): 2009-2010.
- Taberlet P., Fumagalli L., Wust-Saucy A.G. & Cosson J.F. (1998) Comparative phylogeography and postglacial colonization routes in Europe. *Molecular Ecology*, 7, 453-464.
- Thuiller W., Lavorel S., Araujo M.B., Sykes M.T. & Prentice I.C. (2005) Climate change threats to plant diversity in Europe. *PNAS*, 102, 8245-8250.
- Von Humboldt A., (1828) 1993. *Alexander von Humboldt über das Universum: die Kosmovorträge 1827/28 in der Berliner Singakademie*. Insel, Frankfurt.
- Wallace A.R. (1878). *Tropical nature and other essays*. Macmillan, London.
- Webb C.O., Ackerly D.D., McPeck M.A. & Donoghue M.J. (2002). Phylogenies and Community Ecology. *Annual Reviews in Ecology and Systematics* 33, 475-505.
- West-Eberhard, M.J. (2003). *Developmental plasticity and evolution*. Oxford University Press.
- Willis K.J. & Birks H J.B. (2006). What is natural? The need for a long-term perspective in biodiversity conservation. *Science*, 314, 1261-1265.
- Wilson K.A., McBride M.F., Bode M. & Possingham H.P. (2006). Prioritizing global conservation efforts. *Nature* 440, 337-340.
- Zeder, M. (2009). The Neolithic Macro-(R)evolution: Macroevolutionary theory and the study of Culture change. *J. Archaeol. Res.* 17:1-63.

Rapporteur : Didier Galop

Avec la collaboration de : Pierre-Marie Badot, Brigitte Crouau-Roy, Laurence Hubert-Moy, Jean-Paul Métailié, Hervé Richard, Jean-François Viel.

■ Depuis les premières manifestations de domestications végétale et animale survenues il y a plus de dix millénaires avec l'émergence des premières économies de production, l'emprise des sociétés humaines sur les milieux n'a cessé de s'accroître entraînant, par la transformation ou la destruction des milieux naturels la création de *milieux artificialisés*. Au cours des deux derniers siècles, et tout particulièrement durant les cinquante dernières années, ce processus d'artificialisation des milieux et du vivant a connu un changement d'échelle inconnu auparavant tant au niveau temporel que spatial et dont les conséquences multiples, pour la plupart imprévisibles, représentent des enjeux sociétaux majeurs qui concernent l'ensemble de nos relations à l'environnement et de manière plus spécifique —cette énumération n'ayant bien évidemment rien d'exhaustif— la conservation des milieux, l'aménagement du territoire, la gestion des risques ou la santé publique. Cette thématique de recherche mise en avant et soutenue par l'Institut Ecologie et Environnement s'est retrouvée au centre des débats qui ont animé l'atelier 3 lors du colloque de prospective de l'INEE. Bien qu'ayant réuni plus d'une trentaine de personnes originaires d'horizons disciplinaires variées (archéologues, géographes, historiens, urbanistes, anthropobiologistes, anthropologues, paléoenvironnementalistes, écologues, biologistes, biogéochimistes...) il convient de souligner qu'une très large proportion des participants à cet atelier émanaient des Sciences Humaines et Sociales. Dans ce contexte nous pouvions espérer que la confrontation et le croisement des concepts, des apports et des compétences de plusieurs communautés scientifiques allaient permettre de dépasser le caractère réducteur d'une vision trop linéaire dans laquelle l'activité humaine serait restée synonyme de dégradation, mais les discussions parfois animées ont rapidement mises en exergue des divergences au niveau des concepts : « artificialisation », « trajectoires », « dégradation » ou bien encore « co-évolution » sont par exemple des

termes qui, d'une discipline à l'autre, ou selon les écoles prennent des significations différentes. A l'heure des changements structurels actuellement en œuvre et incarnés par l'INEE et face à la volonté affichée de fédérer une communauté scientifique, ces problèmes terminologiques demandent à être dépassés pour mettre en œuvre une véritable démarche interdisciplinaire. Nous ne pouvons que souhaiter que l'INEE soit le moteur d'une réflexion visant à renouveler en profondeurs nos questionnements et nos pratiques, concourant de la sorte à « réinventer » collectivement certaines de nos démarches.

Deux grands thèmes de recherches structurants et devant être soutenus par l'INEE ont néanmoins été identifiés. Nous en présentons ici les grandes lignes.

La reconstitution des processus et des conséquences de l'anthropisation sur la longue durée

À l'heure où les préoccupations sociales en matière d'environnement s'expriment dans les notions de durabilité, de réversibilité ou d'irréversibilité des processus, l'étude diachronique des interactions entre les systèmes naturels et les systèmes sociaux représente un des axes forts et novateurs des travaux engagés par une large communauté scientifique dans le domaine de l'environnement au cours de ces dernières années. Les connaissances acquises dans ce domaine apparaissent fondamentales et peuvent servir de fondement au développement souhaitable d'une prospective environnementale.

Dans ce sens, plusieurs pistes de recherches doivent encore être explorées et soutenues dans l'optique d'affiner la caractérisation des co-évolutions homme-milieux et en focalisant notre attention sur les questions des processus et héritages qu'ils soient sociaux, environnementaux ou biologiques :

Améliorer l'identification des ruptures, des rythmes ou cycles à différentes échelles spatio-temporelles ainsi que caractérisation des processus naturels et sociaux à l'œuvre lors des périodes de changement

L'analyse des rythmes, des seuils et des ruptures qui marquent l'histoire non-linéaire de l'environnement doit être renforcée. Les acquis récents ont démontré l'existence de phases de stabilité, d'inertie (d'équilibre) ou, inversement, de changements plus ou moins rapides et brutaux, d'accélération des processus, de ruptures, voire de « crises »

environnementales dont les déterminants font l'objet de débats contradictoires. L'étude de ces rythmes, de leurs durées et de leurs causes situées à l'interface entre mutations sociales et variabilités naturelles doit aujourd'hui faire l'objet d'une analyse fine et d'une évaluation qualitative et quantitative destinée à fonder une modélisation.

Si dans cette perspective l'étude des périodes les plus anciennes mérite d'être poursuivie en tant que référence de l'évolution anthropique sous l'effet des changements climatiques, l'accent doit être également mis sur les changements observés depuis le Néolithique, moment de réelle mise en place des premiers anthroposystèmes et des premières formes d'artificialisation des milieux et du vivant. Les derniers millénaires et derniers siècles restent les plus importants pour mettre en évidence la spécificité relative des temps sociaux et les contradictions avec évolutions climatiques.

Au sujet des causalités et des déterminants à l'origine de ces rythmes et ruptures, l'analyse des changements climatiques entreprise depuis de nombreuses années par une large communauté de géographes physiciens et de paléoenvironnementalistes doit se rapprocher encore plus des études développées par des approches « culturalistes ». L'enjeu est de mesurer les éventuels liens de causalités entre le climat et le dynamisme des sociétés agricoles et ce dans le but d'alimenter les modèles prédictifs.

Point important méritant d'être souligné, la diversité et la complexité des processus impliqués dans l'anthropisation puis l'artificialisation des milieux et du vivant, impose la mise en œuvre de démarches interdisciplinaires dans lesquelles la recherche doit appréhender ces questions à des échelles spatio-temporelles variables.

Améliorer quantitativement (paysages, occupation et usages des sols) et qualitativement (usages, pratiques, savoirs, techniques) les reconstitutions ainsi que la résolution chronologique

En prise directe avec le point précédent, le renforcement des démarches quantitatives semble s'imposer comme une étape indispensable à l'avancée des recherches en permettant de tester des hypothèses, d'approcher la réalité en donnant des ordres de grandeurs (superficies déboisées, surfaces emblavées, dégradation des sols...) et de vérifier la cohérence des interprétations. Cette démarche concerne les géographes et les paléoenvironnementalistes, mais également les archéologues pour lesquels les variations démographiques, les stratégies de subsistance, ou le déplacement des centres de gravité des populations demandent à être quantifiés avec plus de précision.

L'étude et la caractérisation des pratiques, des usages ou des techniques s'avère être une piste de recherche fondamentale à développer dans l'étude des processus et conséquences de l'anthropisation tout autant que pour l'analyse des modes de gestions et d'exploitation des

ressources naturelles par les sociétés du passé.

Enfin, la question de la chronologie, et plus particulièrement de la résolution chronologique des reconstitutions, occupe une place centrale dans l'approche interdisciplinaire des interrelations homme/milieux. Le problème des échelles temporelles (décalages, synchronismes, asynchronismes) ne sera convenablement traité qu'à la condition de progresser dans la systématisation de la haute résolution et de la précision chronologique (en particulier dans le domaine de l'archéologie et de l'étude des archives sédimentaires). Le renforcement des méthodes de datation à haute précision ainsi qu'un appui aux équipes travaillant dans le domaine de la chronologie (géoarchéologie, dendrochronologie, ...) sont indispensables.

Renforcer les démarches visant à la constitution de référentiels

Qu'il s'agisse de référentiels actuels transposables au passé ou anciens éclairant les dynamiques actuelles ou futures, les investigations engagées dans le domaine des reconstitutions des co-évolutions homme-milieux ne peuvent faire l'impasse sur une étude approfondie de la situation et des dynamiques actuelles. Il s'agit en effet du seul état de référence observable qui puisse être comparé aux reconstitutions des états passés, ainsi qu'à l'analyse des processus et du fonctionnement des systèmes dans la durée. Nous incitons par conséquent l'institut à encourager l'élaboration de tels référentiels, soit par l'observation de terrain, soit par l'expérimentation en laboratoire en favorisant les recherches et les observatoires sur les dynamiques actuelles et subactuelles des écosystèmes anthropisés ou non.

Développer des approches modélisatrices applicables au passé et pouvant être mobilisées dans la réalisation de scénarios prospectifs

Une analyse modélisatrice rétrospective doit être généralisée au niveau de l'évolution de la construction des territoires, des habitats mais également des productions, qu'elle soit agricoles ou relative aux systèmes techniques de production d'objets manufacturés et de leurs conséquences environnementales (exploitation des ressources, pollutions...). Face à cette problématique des outils spécifiques de modélisation devront être développés.

Les processus de l'anthropisation contemporaine et à venir

Caractériser les nouvelles modalités de l'anthropisation (artificialisation, seuils, ruptures techniques et scientifiques) et leurs dynamiques spatiales

On peut considérer qu'un seuil majeur a été franchi dans les processus d'anthropisation au cours du XX^e siècle. L'artificialisation croissante des

systèmes socio-naturels constitue désormais un fait environnemental global, qui prend des formes très diverses selon qu'il s'agit de la création ou expansion accélérée de nouveaux systèmes (déforestation, croissance urbaine), de la volonté de contrôle sur de grands systèmes naturels (océans et littoraux), ou de l'intensification de systèmes anthropisés anciens (agriculture, foresterie). Cette évolution, qui est basée sur l'innovation technique, la volonté d'accroître les ressources et de maîtriser les risques, se heurte cependant à des limites et contraintes biophysiques nouvelles entraînant de grandes difficultés de contrôle. Parmi les formes de cette artificialisation à long terme on peut notamment relever :

- l'artificialisation des sols. L'intensification agricole et la croissance des zones aménagées par l'homme constituent aujourd'hui une menace pour le sol, qui est une ressource non renouvelable à l'échelle humaine. Les sols subissent également une artificialisation indirecte en raison de contaminations et pollutions diffuses mais souvent à longue rémanence (métaux lourds, polluants organiques persistants, etc.).
- l'étalement urbain et périurbain. La métropolisation et le développement urbain constituent un des phénomènes du XXe siècle ayant le plus fort impact sur l'environnement. Au-delà de l'analyse du système urbain en soi (flux, pollutions, climat local, ...), les dynamiques à l'interface des espaces urbains et agricoles constituent des terrains d'analyses extrêmement féconds des recompositions paysagères. L'urbanisation des littoraux est également un fait marquant du dernier demi-siècle, entraînant de forts impacts (réaménagement de la ligne de cote, pollutions, dégradation des mers) et de nouvelles contraintes (notamment dans la perspective d'une montée du niveau des océans).
- L'artificialisation biologique. Depuis quelques décennies, le formidable essor des bio-technologies - médecine incluse - confère à l'espèce humaine un pouvoir sans précédent sur les flux d'informations biologiques. Les populations et les systèmes écologiques sont depuis lors soumis à une artificialisation «biologique». Les conséquences potentielles de ces bouleversements sont sans précédent.

Identifier à toutes les échelles les modifications des fonctions remplies par les milieux, induites par ces formes d'anthropisation

Ce thème de recherche a pour but d'étudier les dynamiques de la biodiversité en relation avec l'évolution des milieux et des paysages, selon un gradient d'intensité de l'anthropisation. Ces recherches ont notamment pour objet d'analyser les effets des activités socio-économiques et des politiques publiques sur les dynamiques spatio-temporelles de la biodiversité. Dans ce cadre, il est nécessaire d'identifier les fonctions qui sont actuellement remplies par les milieux et d'évaluer les conséquences des modifications induites en termes de fonctionnement

systémique à toutes les échelles spatiale et temporelle, et à tous les niveaux d'organisation biologique. Ces questions dépassent bien sûr le strict cadre scientifique et sont au cœur des choix de société.

La dynamique spatiale de l'artificialisation correspond pour partie à des phénomènes locaux liés à la plus ou moins grande densité des populations humaines. Mais dans le même temps, certains processus se manifestent à une échelle globale : changement climatique, pollution atmosphérique, contaminations des océans par le mercure...

Engager des recherches sur les processus de déprise, de désaménagement, de renaturation et leurs conséquences environnementales et sociales

Au moment même d'une phase sans précédent d'artificialisation globale des anthroposystèmes, on assiste, essentiellement dans les pays du Nord, à des processus rapides d'abandon et de déprise dans les zones d'agriculture marginalisée. Ces processus spontanés créent de nouveaux paysages végétaux (néo-forêts, friches) aux dynamiques contrastées en fonction des héritages ou inerties (pédologiques, phytocécologiques, etc.) et des contraintes nouvelles (incendies, par ex.). La durabilité de cet « ensauvagement » doit être étudiée en fonction, d'une part, des caractéristiques biophysiques nouvelles du processus (l'importance des plantes exogènes, voire invasives, distingue la période actuelle des phases historiques précédentes), et d'autre part en fonction d'une prospective à moyen terme de l'évolution socio-économique des zones touchées par la déprise. Le contexte du changement climatique rajoute des facteurs d'incertitude dans l'analyse prospective de l'évolution de ces nouveaux systèmes socio-naturels.

Par ailleurs, on assiste aujourd'hui à des aménagements environnementaux basés sur le principe de re-naturation : création de réserves intégrales, remise en eau de marais, démontage d'aménagements fluviaux, réintroduction d'espèces menacées ou disparues, ... L'ampleur et les conséquences de ces opérations, tant au niveau bio-physique que social, sont à analyser.

Recherches sur les aléas, les risques, la vulnérabilité

L'émergence de la question du changement climatique a conduit au cours des dernières années à repenser la problématique des risques naturels traditionnels (inondations, avalanches...), en l'étendant aux risques environnementaux (pénurie et pollution des eaux, risques

sanitaires et épidémiologiques...). Dans ce contexte, les questions liées aux risques doivent être abordées sous plusieurs angles : aléa et vulnérabilité ; perception sociale des risques environnementaux, évaluation et gestion ; conséquences des mutations environnementales en termes de santé humaine ; caractérisation des effets des politiques publiques.

Sur le plan de la recherche fondamentale, deux objectifs principaux peuvent être fixés : 1. identifier et caractériser des indicateurs d'état et des indicateurs d'évolution des risques ; 2. élaborer des référentiels des dynamiques actuelles. Par ailleurs, la probabilité d'une plus grande instabilité climatique, suggérée par divers modèles, met en avant la question des réactions sociales face à cette évolution, tout comme celles des changements de comportements face à la modification des ressources.

Développer des approches modélisatrices et en matière de gestion de l'incertitude (approches prédictives, prospectives)

Les difficultés pour réaliser une prospective de l'évolution actuelle des systèmes anthropisés imposent de *développer des outils* permettant d'identifier les plus significatifs des paramètres qui modulent les réponses des systèmes. De très nombreuses questions restent ouvertes et les besoins de recherche sont très importants. Quelques pistes envisageables :

- en matière de substances chimiques, la diversité des molécules à étudier est extrême et les effets de nombre d'entre elles sont encore largement ignorés. A côté des polluants «classiques» (HAP, métaux lourds, pesticides, ...), les risques écologiques et sanitaires liés aux polluants émergents (perturbateurs endocriniens, substances médicamenteuses...) doivent impérativement être évalués.
- les recherches portant sur la caractérisation et la modélisation des dynamiques spatio-temporelles des paysages multiples et variées (changements lents, graduels ou très rapides...) sont essentielles pour approfondir et améliorer les connaissances nécessaires aux décideurs et aux aménageurs, pour tendre vers une gestion durable des territoires. L'utilisation d'outils et de méthodes innovantes issus ou en lien avec la géomatique (SIG, télédétection, capteurs in situ, etc.) est indispensable pour caractériser qualitativement et quantitativement et spatialiser les dynamiques paysagères et établir des indicateurs environnementaux. Mais il est aussi nécessaire d'approfondir l'intégration des dynamiques temporelles paléoenvironnementales et contemporaines, à petite et grande échelle.

Analyser les processus de résilience des systèmes anthropisés

Dans le cas des systèmes anthropisés, le concept de résilience correspond à la capacité des sociétés humaines à maintenir le fonctionnement d'un système complexe en développant des stratégies adaptatives.

Dans le contexte du changement global et de l'accroissement des incertitudes, l'analyse de la résilience des systèmes plus ou moins anthropisés représente un enjeu scientifique majeur, notamment en ce qui concerne l'évolution des systèmes agricoles et des hydrosystèmes. Mais l'étude des capacités de résilience des grands biomes soumis à des mutations profondes (océans, forêts tropicales, par ex.) fait également partie des objectifs prioritaires.

Communautés concernées

Largement dominée par les sciences humaines et sociales, la composition de l'atelier 3 reflétait la diversité de la communauté scientifique impliquée dans les approches diachroniques de l'environnement et des relations hommes/milieux (archéologues, paléoenvironmentalistes, historiens, géographes, anthropologues), ainsi que dans les recherches plus actualistes (urbanistes, géomaticiens, écologues...). Dans ce contexte, la nécessité d'un renforcement de l'interdisciplinarité a largement été évoquée et doit s'opérer par la mise en œuvre d'interactions et de collaborations avec d'autres composantes des SHS qui restent encore modestement impliquées dans ces domaines de recherche (sociologie, économie, philosophie de l'environnement, écologie politique...), mais aussi, et ce point est fondamental, avec les sciences de l'environnement (biologie, ethnobiologie, chimie, écologie, agronomie, ingénierie écologique...). Si l'interdisciplinarité est souhaitée, elle devra néanmoins se développer sur des piliers disciplinaires forts dans le respect de leurs propres procédures de validation.

Positionnement national et international

Les questions relatives au positionnement vis-à-vis des contextes nationaux et internationaux ont été dominées par celles concernant le positionnement et l'intégration d'une partie de la communauté scientifique présente lors des débats au sein du nouvel institut. Néanmoins, les réflexions ayant permis l'identification des thématiques de recherches ont été conduites avec en ligne de mire le contexte scientifique international dans lequel elle s'intègre.

Partenariats avec les autres instituts où autres établissements de recherche

Si dans ces domaines de recherches les partenariats sont déjà nombreux et féconds entre les différents instituts du CNRS il est nécessaire de les consolider et de promouvoir des actions de recherches interdisciplinaires et interinstitutionnelles en direction d'autres établissements de recherches tels que l'INRA, l'IRD, le CEMAGREF, mais également avec l'INRAP dans le cadre des opérations d'archéologie préventives. Une autre démarche consistera à favoriser les rapprochements et les collaborations entre les acteurs responsables d'activités exerçant des pressions anthropiques importantes (acteurs économiques, collectiv-

tés...), les acteurs gestionnaires de l'environnement et des systèmes écologiques et la communauté scientifique.

Outils, priorités et pistes d'actions

Outre les pistes de recherches évoquées précédemment et sur lesquelles nous ne reviendrons pas, il est tout d'abord important d'insister sur la nécessité de renforcer les axes de recherches existants en assurant un maintien des thématiques fortes de recherches et des effectifs (chercheurs et ITA) et en satisfaisant aux besoins en matière d'instrumentation et d'analyses (réseaux d'équipements, de plateformes techniques...). Dans ce domaine, la mise en place d'une enquête concernant les besoins analytiques semble nécessaire. De même, en ce qui concerne les plateformes techniques existantes ou en projet, qu'elles soient régionales, nationales ou interinstitutionnelles, une large part de la communauté souhaite une amélioration de l'information concernant à la fois la création mais également les modalités d'accès à ces plateformes.

Si le renforcement de l'interdisciplinarité a été maintes fois évoqué lors des débats, il est évident que son efficacité est étroitement liée à une pratique de terrain permettant la convergence géographique des recherches. Les résultats acquis dans le cadre des « zones-atelier » sur la compréhension des modes de fonctionnement des anthroposystèmes, ainsi que la production de données nécessaires à l'évaluation des conséquences éventuelles des mesures de gestion ou à la prévision des évolutions futures doivent inciter l'INEE à renforcer et/ou à développer ces dispositifs. Il conviendra d'une part de pérenniser les ateliers existants mais aussi d'ouvrir de nouveaux terrains de recherches (création de nouvelles ZA et Observatoires Homme Milieu) dotés de moyens financiers et humains suffisants.

L'organisation de rencontres et d'échanges multidisciplinaires (workshops, écoles thématiques) plus fréquentes peut également contribuer à fédérer la communauté scientifique.

Enfin, un point essentiel repose sur le lancement d'appels d'offres réguliers capables de structurer les recherches en les inscrivant dans la durée.

Rapporteur : Christiane Weber

Avec la collaboration de : Jean-Jacques Delannoy, Françoise Gourmelon, Marc Robin, Jean-Pierre Feral, Thierry Tatoni.

Restitution de l'atelier

Définition de travail : « Biome »

On définit classiquement un biome (du grec bios = vie), comme « un ensemble d'écosystèmes caractéristique d'une aire biogéographique et nommé à partir de la végétation et des espèces animales qui y prédominent et y sont adaptées »

Dans le cadre de l'atelier 4, l'emprunt terminologique à la notion usuelle du terme Biome a été débattu et précisé de manière à souligner leur dimension marquée de socio-éco-systèmes (SESs). Ils se rapportent à des systèmes ayant des traits fonctionnels associés à des traits géographiques, écologiques et climatiques et pour lesquels les sociétés humaines ont une place majeure. S'ils sont concernés en partie par des actions de préservation, ils concentrent en sus des préoccupations de gestion et d'adaptation sur le long terme.

L'intérêt des nouveaux biomes est de centrer l'attention sur les mutations socio-économiques actuelles (pression démographique, métropolisation, économie mondiale) et les bouleversements induits par les changements environnementaux planétaires (changements climatiques, déclin de la biodiversité, modification des usages, etc.).

La justification de ce choix terminologique s'est fait au regard de l'intérêt nécessaire et pressant que requièrent certains socio-éco-systèmes (SESs) complexes dont le fonctionnement peut être freiné, modifié ou perturbé par des héritages et les pressions actuelles ou à venir. De ce fait, ces nouveaux biomes se définissent par rapport (1) à leur complexité de fonctionnement (processus naturels et socioéconomiques) qui induit une prise en compte pluridisciplinaire et (2) l'urgence d'actions à entreprendre pour maintenir leur équilibre et favoriser des trajectoires adaptatives.

En résumé, ces nouveaux biomes peuvent être définis comme des

- ▶ *Objets empiriques « définis selon le sens commun » et à éprouver par différentes disciplines*
- ▶ *Objets à construire de façon pluridisciplinaire,*
- ▶ *Objets sur lesquels il y a une urgence d'actions pour répondre aux enjeux environnementaux, socio-économiques et territoriaux.*

Identification et caractères communs

Un certain nombre de caractéristiques communes pour ces Biomes ont été identifiées:

1. Il s'agit de lieux d'interface entre des systèmes sociaux et naturels, ces derniers étant particulièrement touchés par une forte pression anthropique ;
2. Ils se caractérisent par des emboîtements d'échelles spatiales, qui de fait associent des niveaux écologiques variés (de l'espèce

aux peuplements) et en structurent les paysages et les territoires concernés ;

3. Une pression anthropique qui peut être inégalement marquée dans l'espace et dans le temps. De plus, ces systèmes ont une extension spatiale souvent délicate à délimiter (zone littorale, urbaine ou de montagne) et des caractéristiques temporelles parfois discontinues (ex. de l'emprise et des activités liées au tourisme) ;
4. Ils sont, de par leur complexité, des objets scientifiques intégrateurs par excellence. Ils ne peuvent être abordés, compris, modélisés voire simulés sans une approche pluridisciplinaire à défaut d'une approche interdisciplinaire qui reste à construire. Comme le souligne Pohl (2001) la pluridisciplinarité requiert des plateformes ou des objets à partager qui favorisent les échanges sur le long terme et permettent d'asseoir des fondements théorique et méthodologique communs ; les Biomes offrent cette opportunité.

Les nouveaux biomes peuvent être abordés sous deux angles distincts :

- ▶ d'une part, en tant que révélateurs des impacts des changements planétaires sur nos sociétés, ils agissent comme des caisses de résonance des altérations portées. Leur vulnérabilité¹ ne réside pas uniquement dans la mise en danger directe ou non de populations, d'activités ou de sites, elle réside aussi dans l'augmentation des connections aléatoires qui se multiplient dans les échanges globaux mais aussi locaux.
- ▶ d'autre part, en tant que lieux initiateurs de modifications, de modalités d'atténuations. Ils offrent une légitimité de terrain. Les organisations sociales et économiques, par leur ancrage local, peuvent ainsi mettre en place des actions innovantes ayant potentiellement un rayonnement à des échelles supra. Les collectivités peuvent, autour de projets territoriaux et/ou de priorités d'action, fédérer des organismes, associations et entreprises. C'est autour de ces actions concrètes de terrain que prendront corps les articulations les organismes de recherche et d'enseignement et la société.

Parmi les questions abordées par les membres de l'atelier certaines portent plus particulièrement sur le fonctionnement de tels biomes : Quels sont les biomes identifiables ? Comment ces biomes prennent-ils en charge les enjeux actuels ? Quels choix politiques et environnementaux est-il possible d'identifier ? Quelles logiques d'adaptation sont à l'œuvre ? Comment évoluent ces écosociosystèmes ? Y a-t-il des formes de pression ou d'accompagnement particulières ?

Les questions de méthode ont été également abordées : comment appréhender, traiter ces biomes ? Comment co-construire les connaissances nécessaires à l'analyse de leur dynamique et évolution ? Ces démarches ne peuvent être issues d'une seule discipline et traitée de

⁴ La vulnérabilité d'un enjeu correspond à « l'ensemble de ce qui est susceptible de dégrader ou d'interrompre son fonctionnement, de le détruire, quelles qu'en soient les raisons » Robert D'Ercole et Pascale Metzger, « La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain », Cybergeo, Vulnérabilités urbaines au sud, article 447. URL : <http://www.cybergeo.eu/index22022.html>.

manière sectorielle et statique. Les interactions et le fonctionnement spatio-temporel doivent être abordés de manière complémentaire et les réponses élaborées de façon à valoriser les efforts pluridisciplinaires et pluri-acteurs. En ce sens, pour les membres de l'atelier, les nouveaux biomes apparaissent comme un creuset des questionnements développés dans les autres ateliers.

Ces nouveaux biomes apparaissent donc comme :

- des lieux d'intégration hybride (entre acteurs publics, collectivités, scientifiques et services de l'Etat) et pluridisciplinaire,
- un nouveau type de scène de gouvernance localisée d'une ou plusieurs questions environnementales ;
- une nouvelle manière de travailler en valorisant la co-construction des objets de recherche entre acteurs scientifiques et de acteurs de terrain.

Quels nouveaux biomes pour l'INEE ?

Les types de biomes susceptibles de devenir les objets de recherche et d'incitation scientifique pluridisciplinaire sont peu nombreux mais illustrent les enjeux scientifiques de l'institut. Trois biomes ont été identifiés : la ville, le littoral et la montagne. Chacun peut être abordé selon les caractéristiques présentées ci-dessus tout en ayant des spécificités liées à la géographie des lieux, à l'évolution et au fonctionnement du SES ainsi qu'aux enjeux auxquels ils font face (cf. *infra*).

- ▶ Le terme « biome » peut s'appliquer à la ville ou à l'espace urbanisé, géographiquement localisé en ce qu'il définit des écosystèmes caractérisés par les interactions entre l'Homme (société) et son milieu (bâti et vivant) (Senecal, 1996).
- ▶ Le biome littoral est un espace multiscalaire, caractérisé par une structure linéaire et une pression humaine importante. Partout dans le monde, il apparaît comme un espace vulnérable où les événements météorologiques et marins se combinent à des pressions exercées par des activités humaines parfois conflictuelles, favorisant des risques d'origine naturelle et/ou anthropique (Robin, 2002).
- ▶ Les régions de montagne, où les impacts des transformations socio-économiques comme du réchauffement climatique en font un « observatoire » des changements environnementaux exemplaire. Ce biome apparaît comme un objet pertinent du fait de l'amplification observée des phénomènes climatiques et anthropiques.

« Nouveau Biome Ville »

La définition d'un « biome urbain », nécessite quelques clarifications sémantiques. Le système urbain se définit dès 1992, comme un écosystème caractérisé par les conditions de vie de l'individu ou de la société c'est à dire « la qualité de l'air, de l'eau, des habitations, le

niveau de pollution par le bruit, les réseaux d'assistance, la densité de la population, le travail, les distances à parcourir, les aspects culturels riches de créativité et d'expérience » (Murdie *et al.*, 1992). Il peut aussi être associé à d'autres aspects constitutifs de l'environnement comme la végétation ou plus précisément le vivant (Senecal, 1996). Le terme « biome » peut ainsi s'appliquer à la ville ou à l'espace urbanisé, géographiquement localisé en ce qu'il définit des écosystèmes caractérisés par les interactions entre l'Homme (société) et son milieu (bâti et vivant).

La vision systémique de la ville introduit une approche intégrée, au carrefour des sciences de l'environnement, des sciences humaines et sociales, des sciences de l'ingénieur pour développer dans une vision interdisciplinaire, à la fois une écologie dans (*in*) la ville et de (*of*) la ville (Mathieu, 2006). Cette vision reste à partager avec de nombreuses disciplines. Si près de 60% de la population mondiale vivent dans des aires urbanisées (projection à 2025 des Nations Unies) il est évident que les répercussions de cette transition urbaine au niveau mondial ne peuvent que perturber la diversité et les processus des systèmes écologiques.

a. Nouveau Biome et croisement disciplinaire

Les biomes urbains sont des objets d'interface disciplinaire. Des thèmes fédérateurs sont potentiellement utilisables comme l'écologie urbaine (humaine), la biodiversité urbaine, le paysage, le métabolisme etc., et certaines théories peuvent aussi être interrogées (la théorie des systèmes, la théorie de l'adaptation, la théorie de la complexité...).

Comme le souligne Evans et Marvin (2006) et Pohl (2001) cette interdisciplinarité requiert l'émergence de connaissances communes c'est-à-dire élaborées dans un contexte non contraint en temps ou en moyens pour co-exister. De même elle doit pouvoir se positionner entre acteurs différents (scientifiques, collectivités, citoyen...) en produisant des connaissances partageables tant scientifiquement sous forme de « savoir expert » que socialement sous forme de « savoir profane ».

Certains domaines sont d'ores et déjà investis par plusieurs disciplines et abordés conjointement. C'est le cas de la biodiversité ou en tout cas de la diversité des espèces en ville (Prévost-Julliard, 2008), qui a acquis une dimension sociale, économique (Maresca et Ranvier, 2006) et juridique. Cette relation délicate entre ville et nature est en mutation actuellement. La dichotomie « urbain / rural » ou « sauvage / domestique » s'estompe, les services rendus par les écosystèmes en ville prennent une part de plus en plus importante dans « les représentations et les conceptions des citoyens, gestionnaires, décideurs et scientifiques » (Daniel, 2004).

Les capacités d'adaptation des socio-éco-systèmes (*socio-ecological system* – SESs) sont aussi un domaine de recherche commun. Là encore, une réelle croisée disciplinaire émerge tentant à la fois d'asseoir les fondements théoriques nécessaires en rapprochant les concepts utilisés en sciences de la nature, sciences sociales et sciences du risque.

Les enjeux identifiés dans le cadre du changement global et les avancées scientifiques réalisées ont une influence sur les rapprochements entre disciplines, contraint à prendre en compte des dimensions spatio-temporelles complémentaires dans la dynamique des processus naturels et des mécanismes sociaux.

b. Promouvoir une vision intégrative à une échelle globale des SESs urbains

La vision intégrative permet de prendre en compte aussi bien les mécanismes sociaux que les processus biophysiques. Les enjeux des biomes urbains tiennent en partie à des tendances profondes qui changent leur positionnement pour les sciences de l'environnement. Parmi les phénomènes majeurs que l'on peut retenir, trois semblent expliquer les bouleversements actuels.

- ▶ L'importance du processus d'urbanisation sur l'ensemble du globe et ses conséquences tant spatiales (formes de développement extra-territoriales) que temporelles (intergénérationnelles) sont des clés importantes de la compréhension des évolutions possibles des SESs.
- ▶ La dépendance des SESs urbains envers les ressources externes afin d'assurer le bon fonctionnement du système (ressources naturelles renouvelables ou non, ressources alimentaires, ressources industrielles – extraction, exploitation, transformation, ressources végétales – pharmacopée, fibres etc.).
- ▶ Les interconnexions favorisant la diffusion de l'information, des connaissances mais aussi des formes d'actions alliant un engagement local sur des questions globales (changement climatique, atteintes à la biodiversité, promotion d'un comportement sobre etc.) se sont diversifiées au sein des SESs. Cette interconnexion peut elle être un élément de faiblesse, d'instabilité (Young *et al.*, 2006) ?

La globalisation a conduit à la création de réseaux supra-nationaux influant parfois fortement sur le fonctionnement des systèmes urbains alors que les actions sont portées et supportées aux échelles nationale, régionale et locale. Les effets d'échelles ne sont ni neutres ni simples. Les intrications des échelles spatiales d'observation et d'action, des niveaux d'organisation socio-économique et politique et des trajectoires d'évolution, complexifient leur compréhension. Il est donc essentiel de renforcer les réflexions sur les SESs Urbains en favorisant les échanges théoriques et méthodologiques pour mieux appréhender et traiter les liens entre les systèmes sociaux et biophysiques et les réalisations assurant leur maintien.

Ces enjeux ne pourront être atteints que par une mobilisation accrue des modèles dans une démarche intégrative et pluridisciplinaire (approches multi-échelles, couplages de modèles...), avec tous les problèmes que cela pose (dynamiques différentes, pas de temps et échelles d'organisation variés etc.). Les passerelles avec les sciences de l'information, les sciences des systèmes complexes sont à renforcer.

c. Comprendre les mécanismes de l'adaptation et accompagner les décisions d'atténuation, de prévention et d'éducation

Les capacités d'adaptation des SESs urbains sont de plus en plus au cœur des recherches ; l'accent étant actuellement le plus souvent mis sur les enjeux du changement climatique. Les villes ont su s'adapter sur la durée en homogénéisant leur environnement pour en contrôler les ressources. A l'heure actuelle la nécessité d'infléchir ou tout au moins de réguler ce contrôle requiert une connaissance plus importante que celle dont nous disposons : connaissance à la fois des structures sociales et économiques mais aussi des dynamiques biophysiques liées.

L'adaptation se considère sur des temps longs, cependant les mesures d'atténuation et de prévention une fois identifiées et mises en place nécessitent engagement politique et adhésion des populations pour être efficaces. Cette adhésion ne peut être acquise que par l'éducation et le rapprochement des savoirs et des attentes sociétales.

Les développements en ingénierie écologique devraient favoriser cette compréhension par le biais d'efforts de prototypage, de valorisation opérationnelle pour ce qui est des moyens d'atténuation. La compréhension des mécanismes d'adaptation repose beaucoup plus sur l'étude des sociétés et de leurs choix sur le long terme. La pluridisciplinarité est essentielle dans ce contexte, le recours à des méthodes des sciences de l'Homme et de la Société comme les enquêtes, les expérimentations, le suivi biographique etc. L'analyse des représentations générées par ces sociétés correspond à une passerelle active entre les Instituts de l'Ecologie et de l'Environnement et des Sciences de l'Homme et de la Société.

d. Anticiper et accompagner les « éco- villes », nouvelles métropoles saines

La notion de métropoles saines ne fait pas uniquement référence à la maladie, mais bien aux conditions de vie nécessaires pour vivre en ville dans de bonnes conditions sociales, économiques, sanitaires etc. La qualité de vie des urbains est influencée par la qualité des SESs urbains : ressources en générale (sols, air, eau, nourriture), services écosystémiques ; richesse des espèces etc.. Les citoyens sont de plus en plus concernés par l'avenir des espaces naturels urbains ou périurbains, par la qualité de leur diversité biologique notamment face à l'étalement urbain

La santé en ville n'est donc pas à prendre en considération uniquement par rapport à la maladie mais bien dans une vision globale associant la structure sociale et économique avec l'environnement urbain et intégrant l'écotoxicologie et les actions de prévention. Certaines études épidémiologiques démontrent les liens qui existent entre les maladies développées en milieu urbain et la ville. Les déterminants environnementaux influent d'autant plus sur l'état de santé des citoyens que les conditions sanitaires sont satisfaisantes ou non. Certaines situations posent par ailleurs des problèmes liés à la mobilité et aux modes de transmission des vecteurs de maladie, comme une vulnérabilité accrue aux épidémies (cf. SRAS) ou aux attaques bactériologiques (cf. travaux menés autour du modèle de mobilité TRANSIM avec l'extension EPISIM - Los Alamos National Laboratory (LANL) ; Zoltan Toroczkaï et Hasan Guclu (2007).

D'autres éléments plus complexes, comme le rôle de la pollution urbaine dans les allergies ou les maladies cardio-vasculaires ont été mis à jours par différents auteurs (Laurent O., Bard D., 2007 ; Jamie *et al.* (2006, 2007). La prise en compte des maladies urbaines et actuelles, comme l'obésité, sont aussi étudiées au regard de l'influence de l'environnement urbain (Vandegrift et Yoked, 2004). Celui-ci agit ainsi plus ou moins directement sur l'hygiène de vie des citoyens, conjugué à des inégalités socio-économiques qui facilitent ou non l'accès aux soins, à une offre alimentaire variée ou à des espaces verts et/ou sportifs.

La pluridisciplinarité conduit à coupler les méthodes et modèles développés en épidémiologie, en géographie, en sciences complexes mais aussi en aménagement et gestion des territoires. Le rapprochement des communautés sur ces aspects doit permettre de positionner ces recherches parmi celles qui se développent actuellement en Europe et aux Etats-Unis.

« Nouveau Biome Littoral »

La première difficulté pour traiter ce « nouveau biome » est sa définition et sa délimitation spatiale. Se restreint-il au trait de côte, à l'estran, ou au contraire s'étend-t-il à toutes les terres qui sont influencées par la présence de la mer ? Pour contourner cet écueil, on le considère comme « l'ensemble des espaces et territoires relevant d'une forte interaction terre/mer tant du point de vue physique, qu'économique et social ». Ceci explique que les délimitations officielles du littoral ou d'une zone côtière des pays riverains d'une mer (ou d'un grand lac) font souvent défaut ou sont d'une étonnante imprécision. En France, la définition juridique inclut les communes riveraines de la mer et éventuellement tout ou partie des estuaires et deltas. Ce problème de définition et délimitation spatiale se traduit par un réel manque de données territorialisées (environnementales et socio-économiques) concernant ce biome.

L'évaluation des changements environnementaux est de plus en plus abordée via la notion de service rendu par l'écosystème côtier en intégrant les forçages et contraintes naturels et anthropiques.

L'approche par les services écosystémiques, institutionnalisée par le Millénaire Ecosystem Assessment (MEA), aborde les enjeux relatifs à la conservation de l'environnement d'une manière nouvelle (Daily, 1997; Costanza *et al.*, 1997; MEA, 2005). A l'interface entre écologie, économie et géographie, elle propose un outil centré sur les interdépendances entre les enjeux écologiques et économiques. D'une conception utilisatrice des écosystèmes, cette approche s'inscrit dans une démarche de gestion intégrée (Boyd (2004). Elle définit quatre grandes catégories de service qui correspondent à des fonctions écosystémiques ou des fonctions sociosystémiques : les services de support, les services de production, les services de régulation et les services culturels.

a. Services rendus par les écosystèmes côtiers

Les zones intertidales et subtidales sont caractérisées par des habitats dont la valeur écologique et économique a été longtemps sous-estimée ou partiellement estimée (Green, Short, 2003). Costanza *et al.* (1997) posent les bases d'une évaluation de la valeur des écosystèmes liée aux services rendus, qui ont été précisées dans le cadre du MEA (2005) (Barbier, 2007). Depuis, les programmes de surveillance environnementale et d'évaluation (*United Nations Environment Program*, Directive européenne Cadre sur l'Eau, etc.) peuvent utiliser ces estimations pour quantifier le coût des impacts anthropiques ou justifier tel ou tel acte de gestion. La valeur des herbiers d'angiospermes a, par exemple, été estimée à 190 000 \$ par hectare et par an. Les services écologiques justifiant ce montant sont a) la réduction du risque d'eutrophisation des zones côtières par l'absorption des nutriments (azote, phosphore) d'origine terrigène, b) la limitation de l'érosion côtière grâce aux réseaux de rhizomes souterrains qui stabilisent les sédiments, c) leur rôle de nurserie et d'habitat pour des poissons d'intérêt commercial, d) leur fonction de réservoir de biodiversité. Ce qui est vrai pour cet habitat l'est au même titre ou à d'autres titres pour d'autres habitats côtiers.

L'attente en matière d'évaluation des services rendus par les écosystèmes représente une tâche considérable nécessitant la mobilisation de nombreuses disciplines (Costanza, 2008 ; Chapman., 2008 ; Beaumont *et al.*, 2007).

b. Evolution des services écosystémiques / changements environnementaux planétaires : enjeux scientifiques

Dans le contexte actuel de changements environnementaux planétaires, les habitats côtiers sont soumis à diverses contraintes. Pour reprendre

le cas de la zone intertidale/subtidale, elle est sous des menaces (aléas d'origine naturelle (*eg.* houle cyclonique ou charge terrigène génératrice d'envasement) ou sociétale (*eg.* pollution, surféquentation). En retour, la disparition d'habitat peut avoir des répercussions négatives sur les autres compartiments de l'écosystème côtier. Par exemple, la disparition d'une vasière auto-épuratrice a des conséquences sanitaires sur les exploitations conchylicoles, sur des gisements coquilliers exploités, voire encore sur la qualité des eaux de baignade...

L'évaluation des conséquences environnementales et sociétales sur les zones côtières constitue un enjeu de recherche important, qui doit prendre en compte l'ensemble des impacts tant directs qu'indirects.

- Impacts directs :

L'élévation du niveau de la mer influence directement la géométrie du trait de côte avec les incidences que cela induit (érosion/accumulation, stabilité des côtes...). Dans ce contexte, l'ensemble des structures de défenses côtières notamment contre les surcotes (digue des polders) est à recalibrer.

Le changement du régime des tempêtes impacte également directement les traits de côte. La modélisation hydrodynamique côtière avec les nouveaux forçages issus des modèles prédictifs est incontournable pour répondre aux nouveaux aléas et repenser certains aménagements de la zone côtière. De nouveaux modes d'action face à l'érosion côtière doivent être également posés afin de participer activement à la régénération des écosystèmes côtiers (*eg.* défenses douces).

- Impacts indirects :

Les modifications des précipitations et des températures se traduisent par des changements qualitatifs et quantitatifs des flux issus des bassins versants côtiers vers la zone côtière. Les écosystèmes côtiers sont menacés par ces nouveaux intrants (qualité de l'eau et des ressources halieutiques, etc.). Les changements hydrodynamiques impactent aussi très fortement l'équilibre des ressources côtières (habitats marins des petits fonds) par la redistribution des stocks sédimentaires avec des effets de *feed-backs* évidents. Les conséquences écologiques et économiques doivent être plus finement évaluées. Les ressources halieutiques s'en trouvent fragilisées (modulation de la chaîne trophiques, développement des compétiteurs trophiques, modulations des habitats marins impactant les ressources exploitées etc.). Les interactions démographiques avec le continent sont, enfin, à l'origine de l'accroissement de la pression foncière, des problèmes d'accès, de gestion des ressources (eau, espaces récréatifs etc.) et de banalisation du littoral.

c. Reconnaissance d'un « Biome en crise » : le bassin Méditerranéen

Le phénomène de *littoralisation*, liée à l'accroissement de la pression anthropique, est particulièrement fort sur le littoral méditerranéen. Ce phénomène interpelle d'autant plus notre communauté que la région méditerranéenne (*sensu lato*) est l'un des 34 points chauds de biodi-

versité de la planète. Ce *hotspot* est aussi l'un des plus menacés par les impacts anthropiques et les effets du réchauffement climatique, ce qui a conduit à l'identifier récemment en tant que « biome en crise ».

- Le milieu marin et les menaces

Elle présente une très grande richesse liée à l'histoire géologique de cette mer au cours du Tertiaire (*eg.* crise messinienne) et des « pompages » post-pliocènes de l'Atlantique, alternativement Nord et Sud – glaciaire et interglaciaire. On considère que la Méditerranée abrite de 12 à 15,000 espèces. Avec 0.8% de la surface de l'Océan mondial, elle héberge 4 à 18% de la biodiversité selon les groupes taxonomiques considérés. Sa faune et sa flore comportent environ 20 à 30% d'espèces endémiques. La biodiversité marine méditerranéenne (= ressources) est concentrée dans les milieux peu profonds (5% de la surface de la Méditerranée), situés au voisinage des côtes, qui sont aussi le lieu d'aménagements et le réceptacle d'une grande partie des rejets, ce qui en fait la zone la plus soumise aux pressions de l'activité humaine et la plus vulnérable.

- La partie continentale et les menaces

Elle abrite une concentration exceptionnelle en espèces, notamment chez les végétaux supérieurs, les oiseaux, les reptiles et les invertébrés. Sur cette surface égale à 2% de la superficie du globe, on recense 20% des plantes à fleur et fougères de la planète. En France, la zone soumise au bioclimat méditerranéen ne représente que 11% du territoire national, mais elle abrite environ les trois-quarts des végétaux supérieurs et entre 55 et 90% des vertébrés du pays. Cette richesse biologique est à rechercher tant dans l'histoire géologique et bio-climatique de cette région que dans l'ancienneté des occupations humaines. Ayant abrité de nombreux refuges pendant les épisodes froids plio-pléistocènes, c'est aussi un lieu de brassage de flore et de faune, et de spéciation active.

- Une démographie en constante augmentation

Si les premières étapes de colonisation remontent au Néolithique, les impacts anthropiques sont liés aux grandes phases d'anthropisation de cet espace (Antiquité, Moyen âge, XVIII-XIX^e...) qui se sont traduites par une importante artificialisation du milieu (déforestation, pâturage intensif, incendies, érosion des sols infrastructures notamment littorales). Aujourd'hui, environ 300 millions d'êtres humains vivent dans le bassin méditerranéen. Les pénuries d'eau et la désertification sont de plus en plus prégnantes dans les territoires méditerranéens. Elles ont pour incidence la migration et la concentration de la population et des activités sur le littoral ; concentration qui a pour effet l'artificialisation et la fragmentation des habitats et menace le maintien de la biodiversité. Nombre d'espèces endémiques sont confinées à de très petits espaces et sont de ce fait extrêmement vulnérables.

Le développement du tourisme a accentué la pression sur les écosystèmes côtiers. Les rives de la Méditerranée représentent la plus grande concentration touristique du monde, avec 110 millions de visiteurs par an (30% des destinations touristiques mondiales). La construction des infrastructures touristiques et leurs impacts directs représentent un réel danger sans cesse croissant sur les zones côtières.

L'anthropisation du bassin et du littoral méditerranéen est à l'origine de la détérioration environnementale qui depuis les 50 dernières années a connu une forte accélération. On distingue parmi les causes de la perte et de la dégradation de la biodiversité en sus des effets liés aux changements climatiques planétaires :

- ▶ la fragmentation et la perte des habitats naturels ;
- ▶ les invasions biologiques ;
- ▶ les pollutions (retombées atmosphériques - embruns et aérosols -, apports des fleuves, des émissaires, mariculture, hydrocarbures, peintures anti-fouling, eaux chaudes, intrants chimiques, détergents, métaux lourds, radionucléides, déchets, virus et bactéries [eaux usées], envasement, navigation de plaisance) ;
- ▶ l'augmentation de la population et de l'exploitation concomitante des ressources avec notamment l'accroissement du trafic maritime et terrestre, et le développement d'aéroport côtier ;
- ▶ l'aménagement des fleuves et du littoral (mise en valeur et occupation des zones littorales à des fins industrielles, touristiques et résidentielles / artificialisation) ;
- ▶ les prélèvements (pêches, collectes) en très grande majorité sur les stocks sauvages : développement indigent de la mariculture par rapport à l'agriculture.

d. Constat et conclusion

Répondre à l'ensemble des problématiques posées par les concepts de services écosystémiques et de « biome méditerranéen en crise » suppose de disposer d'un socle suffisant de connaissances et de données. L'approche globale des biomes littoraux nécessite également une bonne appréhension des interactions continent/littoral/mer. Si cette dynamique est lancée, elle doit être encouragée pour disposer des informations et suivis nécessaires à la compréhension de ces biomes et aux modes de remédiation. L'état actuel des connaissances et de leur diffusion sont un des facteurs de sous évaluation de la diversité biologique et des ressources naturelles.

La prise en compte de ces phénomènes, dans le cadre du développement durable, nécessite une démarche intégrative tant pour l'étude

de ces milieux que la définition de modes de conservation qui doit dépasser nécessairement le clivage terre/mer. C'est à cet enjeu que nous devons nous atteler.

« Nouveau Biome Montagne »

On peut, *a priori*, être étonné de traiter les zones de montagne dans cette réflexion sur les « nouveaux biomes ». L'image des « montagnes » est souvent associée à celle d'espaces peu anthropisés, d'une « nature préservée » où les espaces protégés prennent le pas sur les autres dimensions de la montagne. Cette perception ne tient pas compte des vastes régions de la planète (i) où la majorité de la population se concentre en montagne (Afrique orientale, Asie du Sud-Est et Amérique latine équatoriale et tropicale.), (ii) où l'essentiel de l'économie repose sur les activités agricoles, les ressources et les patrimoines de montagne (café, eau, minerais, énergie, tourisme...), et (iii) où la métropolisation se développe préférentiellement en montagne (ex. Bogota, Quito, Addis Ababa,) voire s'étend vers la montagne (ex. du Liban).

Plus de la moitié des pays de la planète est concernée par les espaces de montagne dont l'influence va bien au delà de leur délimitation spatiale dès lors qu'on prend en compte les flux naturels (eau), humains (touristiques, résidentiels...) et économiques (énergies, produits agricoles...). Enfin, une lecture avisée des milieux de montagne met rapidement en avant l'importance de son anthropisation, certes très différente des régions urbaines et littorales. Son caractère, à la fois, diffus (usages agro-pastoral, sylvicole, aménagements hydrauliques...) et concentré (tourisme hivernal, urbanisation des vallées et piémonts...) crée une dialectique particulière en termes de gestion des ressources, des flux, des risques et de répartition des services. Cette spécificité est d'autant plus forte dès lors qu'on prend en compte les logiques « versants/vallées », « amont/aval », les relations « montagne/piémont », et les différentes déclinaisons d'interdépendance (médiales, économiques, territoriales). La compréhension de ces interactions est un point obligé pour appréhender l'évolution des systèmes de montagne impactés par les changements planétaires actuels et à venir ; elle passe par une approche résolument interdisciplinaire et participative associant les territoires et leurs acteurs.

a. D'une question de définition à l'indigence et fragmentation des données

On retrouve la même difficulté que celle rencontrée pour le littoral : la définition et la délimitation des régions de montagne. Ce problème n'est pas nouveau : c'est quoi une montagne ? Où commence et se termine une montagne ? Questions terriblement simples auxquelles existent peu de réponses satisfaisantes dès lors qu'on désire l'aborder dans sa globalité. Ce problème n'est pas anodin car se greffe sur ce problème de délimitation la question des données caractérisant ces régions. Aussi étonnant que cela puisse paraître, rares sont les données spécifiques aux régions de montagne et cela concerne aussi bien l'hydrologie,

les activités économiques, la démographie, les flux, etc. Les raisons sont aussi diverses que multiples : géopolitique (zone de frontière), culturelles (zone de refuge), administrative (découpage des inventaires rarement sur des logiques spatiales), imaginaire (nature « intacte », profusion des ressources)... (Messerli et Ives, 1999 ; Debarbieux *et al.*, 2000). A cette indigence de données, s'ajoute une autre difficulté : leur fragmentation entre de nombreux acteurs de terrain, institutions, organismes. Ce double problème pose de réelles difficultés dès lors qu'on souhaite définir les modes de gestion intégrée des ressources (*eg* eau, biodiversité), modéliser les dynamiques environnementales, définir les bases du développement durable et partagé. Ces questions se posent avec d'autant plus d'acuité que la montagne est fortement impactée par les changements planétaires.

Définir avec précision ces effets sur l'environnement, les pratiques et les territoires de montagne nécessite une meilleure prise en compte par les « institutions » des spécificités « montagne ». Penser la montagne en tant que « nouveaux biomes » a pour effet de mettre l'ensemble des acteurs, dont la recherche, devant certaines réalités souvent ignorées. Les effets perçus des changements environnementaux actuels constituent de réels leviers pour poser la place et le rôle des sciences de l'environnement dans l'acquisition de données intégratives, la construction d'outils de suivi et de simulation et son implication dans l'aide à la décision et la gestion intégrée des ressources.

b. Changements climatiques : enjeux scientifiques, environnementaux et territoriaux.

Les montagnes sont particulièrement touchées par les changements actuels. A titre d'exemple, le réchauffement des Alpes est 2 fois plus important que celui observé à l'échelle de l'hémisphère nord et 3 fois plus important qu'à l'échelle planétaire (Beniston, 2005). Le GIEC (rapport 2007) considère que les régions de montagne et littorales sont parmi les territoires les plus vulnérables aux changements climatiques. Si l'élévation de température impacte fortement les éco- et hydrosystèmes de montagne (distribution des espèces, fragmentation des habitats, réduction nivo-glaciaire, régimes hydrologiques, aléas gravitaires, etc.), le changement climatique se décline également en termes de raréfaction de la ressource en eau, d'émergence de nouveaux risques (gravitaires, torrentiels, sécheresse) et de devenir de certaines activités (tourisme d'hiver, agriculture...) (rapport SG Nations Unies /DD dans les régions montagneuses ; 2007). Les réponses à ces impacts se doivent d'être globales.

- Les enjeux sur la ressource en eau

Les montagnes sont considérées comme des châteaux d'eau alimentant, bien au delà des régions de montagne, une population de plus en plus nombreuse. Cette idée de profusion d'eau en montagne a longtemps permis de croire que le problème de la ressource en eau en montagne ne se posait pas et que la multiplication des usages n'était pas source de conflits. Le recul de la couverture nivo-glaciaire (principale réserve

d'eau douce en montagne), l'accentuation des extrêmes hydrologiques, la multiplication des tensions autour des usages (AEP, neige de culture, irrigation, hydroélectricité...) ont mis en avant la vulnérabilité de cette ressource engendrée par le changement climatique. L'une des difficultés rencontrées est la relative indigence des données hydrologiques, notamment dans les parties amont des bassins versants, là où se pose les premiers conflits d'usage. La seconde difficulté est de combattre les réponses sectorielles et techniques (*eg* multiplication des retenues) qui ne prennent pas en compte la globalité de la ressource en eau tant à l'intérieur qu'au delà des régions de montagne (logique amont/aval, recharge des nappes, etc.). La question de l'eau en montagne ne peut être réduite à un simple problème de « tuyaux » et de réservoirs ; elle doit intégrer (i) la part de la couverture nivo-glaciaire dans les réserves, (ii) les impacts des modifications thermiques et des précipitations, (iii) le rôle de la couverture forestière dans la rétention hydrique, (iv) l'impact de l'allongement de la saison végétative dans la disponibilité en eau... ensemble de paramètres qui doit être de plus croisé avec les aménagements hydrauliques, les usages agricoles, les pratiques touristiques et halieutiques et les besoins en eau potable.

Seule une approche globale prenant en compte l'ensemble de ces paramètres est à même de poser les bases d'un gestion durable et intégrée de cette ressource. Si cette prise de conscience fait son chemin tant chez les chercheurs que les acteurs de terrain, de nombreuses recherches restent à mener, de nombreuses acquisitions de données restent à entreprendre et de nombreuses résistances disciplinaires et sectorielles restent à vaincre.

C'est là un des enjeux majeurs du « nouveau biome montagne ». Construire de nouveaux modes de travail, d'acquisition, de traitement et de restitution des données.

Au delà de ce développement centré sur les montagnes européennes, les enjeux sur la ressource en eau concernent la plupart des régions de montagne de la planète, et plus particulièrement celles d'Afrique orientale, d'Asie et d'Amérique latine équatoriale (Comptes Rendus session Nations Unies, pt 56, août 2007).

La réponse à cet enjeu « eau/montagne » nécessite de mieux cerner « la » fonction réservoir de la montagne (nivo-glaciaire/souterrain/cours d'eau/lacs) et son évolution (quantitative et qualitative) liée au changement climatique et aux modifications des usages de l'eau. Face à l'indigence des données disponibles, il y a urgence de définir

les indicateurs pertinents et de réaliser leur suivi (outil observatoire). Compte tenu de l'étroite imbrication des usages et de l'anthropisation des montagnes, seule une démarche pluridisciplinaire et intégrative (impliquant acteurs et gestionnaires) est à même de pouvoir proposer des réponses en termes de gestion durable de cette ressource et de gestion territoriale.

- Les enjeux sur la biodiversité

Les principaux facteurs de l'érosion de la biodiversité en montagne sont l'usage des sols, l'exploitation accrue des ressources et le morcellement de l'espace avec la multiplication des infrastructures et de l'urbanisation. Le changement climatique est un facteur parmi d'autres qui peut devenir déterminant dans un contexte de fragilité. Définir la réponse de la biodiversité aux changements climatiques en région de montagne est une question d'actualité relevée tant par le GIEC (2007) que par les Nations Unies (2007 / 62^{ème} session sur le développement durable des régions montagneuses). On retrouve ici le même niveau de complexité que pour l'eau : faut-il faire la part des différentes pressions sur la biodiversité via des approches uniquement sectorielles ou aborder cette problématique de manière globale tant il est aujourd'hui difficile de faire la part des processus naturels et de l'anthropisation actuelle et passée ?

Comment répondre de manière globale à la modification des écosystèmes de montagne, à la propagation d'espèces exogènes et/ou invasives, à la banalisation biologique et à l'érosion de certaines espèces (haute montagne, lacs...)? L'impact de ces modifications sur les ressources agro-pastorales, sylvicoles et halieutiques de montagne nécessite la définition de stratégies d'adaptation concertées impliquant l'ensemble des acteurs qui travaillent et agissent sur les territoires de montagne.

Si ces questions ne sont pas spécifiques aux régions de montagne, l'importance du réchauffement climatique (2 à 3 fois plus important), la rapidité des réponses biologiques (cf. remontée des espèces végétales de 30m par décennie), la concentration des infrastructures dans les fonds de vallées nécessitent de poser, plus rapidement qu'ailleurs, les pistes d'action visant au maintien de la biodiversité. Les montagnes constituent dès lors des terrains d'anticipation au service des territoires qui seront progressivement impactés par les effets du changement.

Deux priorités se dégagent de cette analyse. La première vise à mieux cerner les effets induits par les changements climatiques ; banalisation ou diversification des paysages? la diversité génétique sera-t-elle favorisée ou non ? Ces incertitudes soulignent la nécessité d'identifier les indicateurs pertinents et de mener un suivi sur le long terme (fonction d'observatoire + modélisation). La seconde concerne la définition des réponses territoriales afin de préserver les réservoirs de biodiversité (à différente altitude) et de renforcer le rôle des pratiques agropastorales à HVE dans le renforcement et/ou maintien de la biodiversité. Cet ensemble d'actions sous-tend une démarche concertée, intégrative et de transfert via la modélisation et les outils de représentation spatiale.

- Les enjeux socio-économiques et territoriaux.

Le changement climatique actuel touche directement de nombreuses activités de montagne (pastoralisme, agriculture, sylviculture, tourisme d'hiver etc.). Les incidences du changement climatique peuvent également être déclinées sous l'angle de la vulnérabilité des territoires de montagne face à l'accentuation des aléas et l'émergence de nouveaux risques dont il reste à définir les impacts tant environnementaux, socio-économiques que culturels.

Se pose de nouveau ici la question de la méthode de travail. Il s'agit, à la fois, (i) d'aborder les stratégies d'adaptation par filière (ou champ de compétences), (ii) de travailler sur leurs synergies et (iii) de raisonner à la bonne échelle spatiale. Aisé dans le discours, ce travail est concrètement tout sauf simple ; il oblige à s'interroger sur l'échelle de travail (massif, bassin versant, montagne et piémont ?), sur le niveau de réponses (locales, nationales, européennes), sur le niveau d'interactions tant *intra-* qu' *infra* (local/global), etc. On retrouve ici la même exigence que pour les nouveaux biomes ville et littoral : définir, créer les bons outils permettant d'intégrer et de modéliser les dynamiques locales et globales, leurs interactions et leurs incidences territoriales, socio-économiques et environnementales ; outils qui n'ont de sens que s'ils mobilisent les différentes communautés scientifiques et que s'ils constituent des supports d'échange et de co-construction des réponses (d'adaptation et d'anticipation) avec les gestionnaires et les acteurs du territoire. La montagne, par la juxtaposition sur de courtes distances d'activités socio-économiques très interdépendantes (logiques amont/aval ; versants/vallées) et liées aux ressources locales, constitue un terrain pertinent pour la définition de ces outils. Il y a là un enjeu majeur pour les sciences de l'environnement.

Dans ce texte, seuls les enjeux via l'entrée du changement climatique ont été abordés. C'est autour de ces enjeux qu'il y a une urgence de réponses. *La prise en compte de la complexité des régions de montagne dans la définition des modes de gestion durable des ressources et des activités, nécessite une démarche intégrative construite sur les nouveaux outils d'acquisition, de traitement et de modélisation des données tant médiales que territoriales. L'enjeu est à la hauteur des attentes.*

Positionnement et partenariats

L'étude des « nouveaux Biomes » nécessite de mobiliser les partenariats tant aux échelles locale, nationale, qu'internationale. Ces trois niveaux sont essentiels dans la bonne conduite des recherches et à la démarche intégrative et partagée souhaitée.

_Au niveau local :

Les collectivités territoriales ont des obligations légales de conservation et de protection (Natura 2000, espaces protégés, parc naturel urbain etc.) tout en ayant des obligations de développement garantissant des bienfaits économiques, une qualité de vie, une équité envi-

ronnementale, une durabilité des éco-sociosystèmes. Des modes de partenariat sont à trouver pour co-construire de la connaissance sur des dossiers requérant, à la fois, une recherche fondamentale et opérationnelle. Cette articulation est essentielle à la réussite des travaux sur les nouveaux biomes, à la diffusion des recherches et l'aide à la décision.

_Au niveau national

Les partenariats s'articulent autour des supports suivants ;

1. les actions programmatiques PIRVE, Post Carbone, R2DS (IdF), ANR (Changements Global, -Villes durables, SYSCOM) PREDIT (sont autant de supports qui illustrent cet intérêt croissant pour des recherches pluridisciplinaires en synergie et qui permettent de construire de nouvelles communautés de recherche ;
2. les actions « réseaux » (GDR, RTP...) qui par leur relative durée (4 à 8 ans) permettent de faire avancer concepts, méthodes et données sur les « nouveaux biomes ».

_Au niveau international :

On retrouve à cette échelle, la même déclinaison que précédemment :

1. les appels d'offre abordent les points présentés ci dessus, peut être pas de façon ciblée sur les biomes, mais ils laissent des ouvertures possibles : 7PCRD, ESF, UNESCO, INTERREGs ;
2. Les réseaux d'observation comme par exemple les « Long Term Ecological Research network » (LTER). Ce réseau international rassemble, en Europe, seize pays (LTER-Europe, 2009, quatre sites LTER pour la France). La plupart des sites LTER à travers le monde effectuent des recherches centrées sur les problématiques environnementales, avec néanmoins une attention sur l'action humaine (transfert de polluants, qualité de l'air...). Au sein de ce réseau, il existe aussi des « social LTER ». centré sur les sites de Phoenix (CAP-LTER) et de Baltimore (BES-LTER) aux Etats-Unis, et de Helsinki (HMA-LTER -Finlande).

Outils, priorités et perspectives de recherche

L'atelier 4 a identifié cinq orientations de recherche pour traiter les « nouveaux Biomes » :

- Une recherche interdisciplinaire à long terme, favorisant l'appréhension et la compréhension des processus et des mécanismes à l'œuvre au sein des biomes.
- Une recherche qui articule les échelles tant au niveau global que local, prenant en compte la complexité des interconnexions et leur état (aléatoires ou non ; actifs ou non ; stables ou non).
- Une recherche abordant les mécanismes et les dynamiques d'adaptation sur des temps longs, ainsi que les ruptures potentielles et leurs effets. Les outils de modélisation (individu-centre ou non) et de simulation, doivent permettre d'appréhender les

processus sur des temps longs et d'envisager des scénarios d'évolution.

- Une recherche fondée sur le dialogue entre les chercheurs, les gestionnaires, les praticiens, les citoyens afin de favoriser l'application des résultats de la recherche dans les activités de planification et de gestion.
- Un accompagnement de la recherche à l'éducation afin de favoriser l'appropriation par les citoyens des mesures d'atténuation nécessaires mais aussi des comportements respectueux de la qualité environnementales de ces biomes

Pour mener à bien ces perspectives de recherche, l'atelier a relevé les outils et moyens d'actions suivants.

Les outils d'observation et de suivi, tels les Zones Atelier ou les Observatoires Hommes/Milieu sont importants pour la mise en place et le développement de recherches interdisciplinaires intégratives car ils favorisent les échanges et les démarches comparatives entre scientifiques d'horizons différents ainsi qu'avec les acteurs mobilisés sur le terrain. L'intégration dans les dispositifs actuels doit pouvoir gagner au développement, autant que possible, d'une approche expérimentale, de modélisation et de simulation.

Un travail exploratoire doit cependant être mené pour définir ce que serait un observatoire autour des nouveaux biomes pour éviter une définition trop vaste du sujet. Cette réflexion doit porter :

1. sur les informations à collecter : Quelles « données » ? Quelles modalités de production ? Quel référencement spatial et temporel ? Quel protocoles standardisés garantissant un contrôle de qualité des données (quantitatives et qualitatives) ? Les informations doivent être collectées, structurées et maintenues selon un protocole reconnu (Directive Inspire) afin d'être disséminées dans de bonnes conditions. Ceci requiert des équipes interdisciplinaires rassemblant à la fois des spécialistes des sciences de l'environnement, de l'information et des théoriciens de la modélisation.
2. sur les systèmes à mettre en place : un des objectifs de ces systèmes d'information localisés est de permettre la collecte et l'archivage de connaissances synthétisées sous formes de tableaux de bord, d'indicateurs, d'inventaires, tout état de la situation à un moment donné pouvant servir de date initiale de collecte de l'information. Ces informations doivent permettre la calibration, l'identification et la modélisation des processus et dynamiques sociales en jeu. Les scénarios élaborés à partir de ces informations doivent faciliter l'énoncé de recommandations pour les décideurs d'aménagement du territoire en apportant expertise, représentation, trajectoire des dynamiques.

Le partage des données facilitant l'optimisation de l'information et sa valorisation doit aussi être abordé. Ainsi la mise en réseau entre plusieurs biomes de même type devrait permettre une plus grande synergie et favoriser les approches comparatives.

Co-construction et évaluation des outils d'action : il s'agit d'accompagner ce processus d'acquisition de connaissance afin de suivre le déploiement des structures à long terme. Des méthodes d'auto-évaluation mais aussi de monitoring doivent être mises en place.

L'atelier 4 suggère, enfin, pour renforcer l'étude de ces nouveaux biomes, l'organisation :

- ▶ d'écoles thématiques sur (1) sur les « nouveaux biomes » ; (2) sur la constitution des observatoires « nouveaux biomes » ; (3)

Références

- Barbier E., 2007. Valuing ecosystem services. *Economic Journal*, 178-229.
- Beaumont N.J., Austen M.C., Atkins J., Burdon D., Degraer S., Dentinho T.P., Derous S., Holm P., Horton T., vanlerland E., Marboe A.H., Starkey D.J., Townsend M., Zarzycki T., 2007. Identification, definition and quantification of goods and services provided by marine biodiversity: Implications for the ecosystem approach. *Marine Pollution Bulletin* 54 (2007), 253 -265.
- Biodiversité; combien est-on prêt à payer ? Une méthode exploratoire appliquée au programme Natura 2000. CREDOC. N°198.
- Boyd J., 2004. What's nature worth? Using indicators to open the black box of ecological valuation. *Resources* 154, 18 -22.
- Chapman P. M., 2008. Ecosystem services: assessment endpoint for scientific investigations. *Marine Pollution Bulletin* 56, 1237-1238.
- Costanza R., 2008. Ecosystem services: Multiple classification system are needed. *Biological Conservation* 141, 350-352.
- Cronon, William (ed.). 1996. *Uncommon Ground: Rethinking the Human Place in Nature*. New York: W.W. Norton and Company.
- Daily G.C., 1997. *Nature's Services. Societal Dependence on Natural Ecosystems*, Washington D.C., Island Press, 392 p.
- Daniel H., 2004. Interactions entre le biodiversité et l'urbanisation. Etude de la dynamique de la végétation indigène en ville. Institut français de la biodiversité. Jeunes chercheurs 2004.
- Dovers S., 2009. Normalizing adaptation, *Global Environmental Change*. 19 : 4-6.
- Evans R. and Marvin S., 2006, Researching the sustainable city: three modes of interdisciplinarity. *Environment and Planning A*, 38: 1009-1028.
- Green E.P., Short T.F., 2003. *World Atlas of Seagrasses*. University of California Press.
- Hily C., van Katwijk M., den Hartog C., 2003. The seagrasses of western Europe. *World Atlas of Seagrasses*. University of California Press.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystem and Human Well-Being: synthesis*, Island Press, 137 p.
- Murdie, R. A., Rhyne, D. et Bates, J., 1992, Modélisation des indicateurs sur la qualité de vie au Canada: une étude de faisabilité, Centre d'études prospectives sur l'habitation et le cadre de vie.
- Pearce Jamie, Karen Witten and Bartie P., 2006, Neighbourhoods and health: a GIS approach to measuring community resource accessibility. *J. Epidemiol. Community Health*. 60: 389-395.
- Pearce Jamie, Karen Witten, Rosemary Hiscock and Tony Blakely, 2007, Are socially disadvantaged neighbourhoods deprived of health-related community resources? *International Journal of Epidemiology* 2007. 36:348-355.
- Pohl C., 2001, How to bridge between natural and social sciences? An analysis of three approaches transdisciplinarity from the Swiss and German field of environmental research. *NSS* 9(3), 37-46.
- Sénécal Gilles, 1996, Notions de paysage et modèles d'analyse Recueil des conférences, Musée des arts et traditions populaires de Québec, Trois-Rivières, le 15 novembre 1996
- Smit et Wandel, 2006, Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*. 16(3), 282-292.
- Toroczka Z. et Guclu H., 2007, Proximity networks and epidemics. *Physica A* 378
- UNH, 2004, Monitoring the Habitat Agenda and the millennium Development Goals> United Nation Human Settlements Programme.
- Vandergrift D., Yoked T., 2004, Obesity rates, income, and suburban sprawl: an analysis of Usstates. *Health & Place* 10 : 221-229.
- Wu J., 2008, Making the Case for Landscape Ecology: An effective Approach of urban sustainability. *Landscape Journal*. 27:41 - 50
- Young O. R., Berkhout F., Galloppin G., Hjänsen M.A., Ostrom E. and van der Leeuw S., 2006, The globalization of socio-ecological systems: As agenda for scientific research. *Global Environmental change*. 16: 304-316.

sur la comparaison entre Biomes et LTER... ;

- ▶ Le lancement d'un RTP sur l'un ou l'autre des nouveaux biomes (RTP Littoral existe, RTP Ville en cours, RTP montage ?) ;
- ▶ La mise en place d'outils de préfiguration à ces observatoires, tels que le PEPS exploratoire, ou des entretiens INEE ou toutes autres formes de soutien à la co-construction sur l'une ou l'autre forme de ces « nouveaux biomes ».

Rapporteurs : Pierre Caumette, Pierre-Marie Badot, Serge Morand.

■ L'atelier a réuni de très nombreux collègues représentant de nombreux champs disciplinaires et appartenant à de nombreuses communautés scientifiques qui ont été passées en revue. Les questions de recherche présentant la plus grande acuité ont été identifiées : déterminants environnementaux des contaminations et expositions, rôle du fonctionnement des écosystèmes et de la structure des habitats dans la dynamique des contaminants et des agents infectieux, impacts des conditions environnementales sur la santé humaine, animale et végétale, relations entre santé, environnement, travail et société, débouchant sur l'expertise environnementale et sanitaire, l'évaluation des risques, et la production d'outils d'aide à la gestion des risques et à l'élaboration des politiques publiques. La prise en compte de la dimension spatio-temporelle des processus, la caractérisation et la biodisponibilité des contaminants et agents infectieux, (b leurs circulations et interactions au sein des écosystèmes, (c) leurs effets sur la santé humaine, animale, végétale et plus globalement sur celle des écosystèmes constituent des préoccupations prioritaires. Des pistes d'actions ont été dégagées ainsi que des propositions d'outils concrets à déployer.

Restitution de l'atelier

Les relations entre santé et environnement doivent s'appréhender dans le cadre des changements planétaires globaux (climatique, démographique, énergétique...) où des contaminants biologiques, physiques chimiques et des agents pathogènes interagissent avec le vivant, dans tous les écosystèmes, affectant la santé humaine, animale et végétale. Par contaminants, nous incluons tout facteur, substance ou pathogène susceptible d'avoir un effet perturbateur sur un organisme vivant, une communauté ou un écosystème. L'écosystème est un système environnement - habitat (terrestre, marin, aquatique, aérien, urbain, industriel) dans lequel le contaminant interagit avec de nombreuses autres composantes physiques, chimiques ou biologiques. La santé humaine et « environnementale » est altérée par de nombreuses pathologies (respiratoires, immuno-allergiques, endocrines, cancers, maladies infectieuses...) dont les principaux dangers viennent de multi-expositions, poly-infections souvent à faibles doses et dont

les effets (intoxications, infections, mutations) font courir des risques à moyen et long terme à l'échelle des individus, mais également des populations et des communautés. L'intérêt pour la santé animale ou végétale réside dans la nécessité d'assurer la sécurité alimentaire des humains, et dans le maintien de l'équilibre des écosystèmes dont celui de la biodiversité spécifique et fonctionnelle.

Les principales questions de recherche abordées lors de l'atelier concernent :

- ▶ l'identification des déterminants environnementaux responsables des contaminations et des risques d'expositions, y compris les changements climatiques ;
- ▶ le rôle de l'environnement, et plus particulièrement du fonctionnement des écosystèmes et de la structure des habitats, dans la dynamique des contaminants et des agents infectieux ;
- ▶ l'exploration des impacts des conditions environnementales sur la santé humaine, et plus spécifiquement les pathologies résultantes et les méthodes d'identification, cela concerne également la santé animale et végétale ;
- ▶ les relations entre santé, environnement, travail et société, débouchant sur l'expertise environnementale et sanitaire, l'évaluation des risques, et la production d'outils d'aide à la gestion des risques et à l'élaboration des politiques publiques
- ▶ la prise en compte de la dimension temporelle des processus. Ces questions se regroupent en trois niveaux d'intégration : (a) la caractérisation et la biodisponibilité des contaminants et agents infectieux, (b) leurs circulations et interactions au sein des écosystèmes, (c) leurs effets sur la santé humaine, animale, végétale et plus globalement sur celle des écosystèmes..

_(a) Caractérisation, biodisponibilité, cinétiques d'action et dynamique des contaminants

Les recherches doivent porter sur la caractérisation d'un ensemble important de contaminants :

- ▶ particulières (dont les micro et nano-matériaux)
- ▶ physiques (rayonnements électromagnétiques, radiations ionisantes, ondes sonores...)
- ▶ chimiques (métalliques, radioéléments, organo-métalliques, HAP, organiques, POP, ...)
- ▶ biologiques (micro-organismes pathogènes et vecteurs, toxines, gènes, hormones, antibiotiques...)

Après les avoir caractérisés, il s'agit de mieux comprendre leurs biodisponibilités, leurs cinétiques d'actions et leurs dynamiques :

- ▶ transferts de gènes pour les agents pathogènes (évolution des virulences et des résistances)
- ▶ effets de l'environnement et des changements climatiques sur la dissémination des pathogènes et de leurs vecteurs (arbovirus...)

- ▶ transferts des contaminants dans les écosystèmes, via les chaînes et réseaux trophiques
- ▶ dissémination, diffusion, transformations, émergence.

La nécessité d'expérimenter suppose de disposer d'écosystèmes modèles. L'expérimentation doit s'associer à la modélisation des transferts, de la dispersion ou dissémination, des transformations ou perturbations.

_(b) Circulations et interactions des contaminants dans les écosystèmes

Le contaminants et agents pathogènes interagissent avec le vivant au sein des écosystèmes (naturels, anthropisés, agricoles, industriels...). Les effets de ces contaminants sur les composantes ou le fonctionnement des écosystèmes (biodiversité) sont peu connus et nécessitent des outils pour leurs suivis (indicateurs biologiques, biomarqueurs, mutations...). Plus spécifiquement, les recherches doivent porter sur :

- ▶ leur écotoxicité et le devenir des pathogènes, réservoirs, transmissions, vecteurs, agents producteurs de toxines, interactions et compétitions avec les micro-organismes autochtones
- ▶ les relations hôtes-pathogènes et leur co-évolution
- ▶ l'évolution des contaminants et leurs modes de transferts dans l'environnement et dans les réseaux trophiques, biotransformations, bioaccumulations, devenir des métabolites issus des biotransformations...)
- ▶ les impacts des changements globaux sur leur dissémination et leur dispersion (modification du climat, des transferts atmosphériques...).

D'un point de vue appliqué, il s'agit de promouvoir l'éco-ingénierie :

- ▶ outils de diagnose et indicateurs de qualité et de «santé» des milieux
- ▶ restauration des environnements et écosystèmes contaminés
- ▶ processus de biorémediation.

_(c) Santé et sociétés

Les contaminants et agents pathogènes ont des impacts sur la santé qu'il s'agit de mieux explorer, des mécanismes infectiologiques aux processus pathologiques.

L'étude des mécanismes moléculaires, cellulaires, tissulaires fait appel à la toxicologie, la physiopathologie, la génotoxicité et l'infectiologie afin de mieux comprendre les mécanismes d'action des contaminants :

- ▶ expositions et multi-expositions à faibles doses
- ▶ co-évolution, adaptation
- ▶ gènes de susceptibilité-résistance.

L'établissement d'une politique scientifiquement fondée de la santé nécessite d'évaluer les dangers et risques pour les populations. Elle nécessite de disposer de données d'expositions (environnementales,

professionnelles, alimentaires) sur des populations humaines à risques exposées à multi-expositions chroniques : relations doses-effets, populations sensibles, perturbations endocriniennes, reprotoxicité, cancérogénèse, asthme, etc.

Les contaminants sont à la base des processus conduisant à de nombreuses maladies : maladies infectieuses en émergence ou ré-émergence, maladies cardio-vasculaires, asthme et maladies respiratoires, maladies immuno-allergiques, cancers, maladies neuro-dégénératives ...

Communautés concernées

Sur le plan disciplinaire, le champ «Santé – Environnement» est l'un de ceux où la plus grande multidisciplinarité est à l'œuvre. A coté d'écologues, de médecins (physiopathologie, santé publique, épidémiologie...), de biologistes (physiologistes, toxicologues...), le thème mobilise des compétences très larges : statisticiens, modélisateurs, chimistes, physiciens, géologues, paléo-environnementalistes, géographes, sociologues et philosophes ou technologues spécialistes de génie des procédés. Le thème a des implications sociétales très fortes (cf rapport Cancer et Environnement) et les attentes citoyennes sont très importantes. Il existe ainsi un continuum entre des activités visant à comprendre et documenter les processus à l'œuvre et les travaux dont les objets ont des finalités plus immédiates et trouvent leur application dans l'élaboration et la mise en œuvre des politiques publiques : évaluation des risques, gestion des risques, mesures compensatoires, aménagement du territoire, sauvegarde, remédiation...

Positionnement national et international

Le thème de l'atelier est à l'agenda de nombreuses agences internationales. Citons par exemple l'initiative récente « One World One Health » qui associe la FAO, l'OIE (organisation internationale pour la santé animale, l'OMS... ainsi que des acteurs des grandes organisations non gouvernementales du domaine de la conservation (WCS)

Le cadre législatif européen avec le règlement REACH, ses directives habitats, la Directive Cadre-Eau, Marine Strategy Framework Directive (MSFD)... impose à tous les acteurs de la recherche de développer recherches génériques et expertises scientifiques. Enfin, le cadre national est très riche avec la Stratégie Nationale de Recherche et d'Innovation et ses défis Santé, Eau, le Plan National Santé Environnement (PNSE).

L'ANR a proposé deux programmes thématiques concernant ce thème :

- ▶ le programme SEST (Santé Environnement et Santé Travail) qui a regroupé toutes les orientations développées dans ce document et qui a permis de financer 120 projets de recherche dans ce thème pendant 3 ans, de 2005 à 2007.
- ▶ le programme CES (Contaminants, Ecosystèmes et Santé) qui

est plus focalisé sur les contaminants, leur devenir dans les écosystèmes et leur impact sur la santé. Ce programme en cours jusqu'à 2010 soutient pour l'instant 44 projets de recherche qui permettent de regrouper des études d'écotoxicologie et de toxicologie.

Partenariats avec les autres instituts ou autres établissements de recherche

La problématique Santé Environnement implique de très nombreuses communautés scientifiques nationales et il est remarquable de constater que ce domaine est celui où le plus grand nombre d'EPST, d'EPIC, d'agences gouvernementales sont impliqués. Sans prétendre à l'exhaustivité, on peut citer

- ▶ Impact sur les ressources : Inra, CEMAGREF, Cirad, Ifremer, Ird, ONEMA...
- ▶ Effets sur la santé: Inserm, IP, ENV, CEA, IRSN...
- ▶ Agences : Afsa, Afsset, ANR, Envs, ADEME, Invs, Ineris, Onema, ONF, ONC, Agences de l'Eau...

De nombreux acteurs industriels sont présents dans ce secteur de recherche et notamment ceux qui oeuvrent dans le domaine de l'énergie, des services environnementaux (déchets, traitements des eaux, sites et sols pollués), de l'aménagement du territoire.

Au sein du CNRS, outre INEE, les autres instituts nationaux sont tous concernés à des degrés divers par cette problématique et notamment :

- ▶ Institut de Chimie : physico-chimie, méthodes, outils analytiques
- ▶ INSU : changements globaux, observatoires
- ▶ Institut des Sciences Biologiques : Biologie intégrative
- ▶ Institut SHS : Risques et sociétés.

L'interphasage au sein des communautés concernées est telle qu'il n'est pas rare que les unités bénéficient du soutien de plusieurs tutelles, dont les politiques sont souvent complémentaires, mais dont les priorités peuvent parfois différer.

Outils, priorités et pistes d'actions

Les progrès dans les connaissances en matière de relations santé et environnement doivent s'accompagner de la mise en place d'outils adaptés.

_Développement d'outils expérimentaux et de caractérisation

La mise en place et (ou) le développement d'outils techniques adaptés conditionnent les avancées.

- ▶ Outils pour la caractérisation plateformes : laboratoires P2, P3, écotoxicologie, toxicologie (lien IBIS), phénotypage, génotypage haut débit, analyses chimiques...

Ceci doit être développé en lien avec les équipements existants et en prévoyant les conditions d'accès, la gestion et l'exploitation des données et notamment les ressources informatiques.

- ▶ Outils pour l'expérimentation très grands équipements : synchrotron, écotron... avec confinement adapté !

- ▶ Outils de stockage d'échantillons environnementaux centres de ressources, insectarium, animalerie, serre, pédothèque, souchothèque... La réflexion doit être conduite aux niveaux local, régional et européen.

- ▶ Outils de modélisation Géomatique, télédétection, spatialisation bioinformatique, écoinformatique...

_Développement d'observatoires et de services d'expérimentation à long terme

Le besoin de disposer de séries temporelles à long terme implique de mettre en place des dispositifs d'observations et d'expérimentations instrumentés permettant de détecter, quantifier et comprendre les évolutions des systèmes. Les liens et la complémentarité avec les dispositifs existants devront être privilégiés.

_Les enjeux scientifiques et les axes émergents

Plusieurs champs apparaissent particulièrement prégnants et permettent de dégager quelques pistes prioritaires.

** Exposition. Multi-exposition. Faibles doses

La quantification des expositions constitue un domaine où les besoins de connaissances et de développement de méthodes sont aigus. La problématique des multi-expositions/infections (expositions combinées – «combined exposure») à des agents multiples correspond aux situations réelles subies par les populations et communautés et doit faire l'objet d'une attention particulière.

En matière de risques liés aux agents chimiques et physiques, les effets des faibles doses constituent un champ où les attentes sont importantes en termes de santé publique.

** Intégrer pour une "Ecologie de la Santé"

Une meilleure appréhension des relations entre environnement et santé passe nécessairement par une approche systémique couplant l'humain et son environnement et par l'intégration des multiples apports disciplinaires touchant au milieu physico-chimique, à la biologie - écologie, à la santé et aux sociétés.

Le développement d'Observatoires Régionaux Environnement – Santé, le renforcement des liens avec les nombreux partenaires potentiels, la

mise en place de stratégies de monitoring, l'identification d'indicateurs pour l'épidémiologie environnementale, la santé des écosystèmes, les services écosystémiques... sont autant de pistes de progrès.

Les actions d'expertise collégiale en «environnement, santé et sociétés» constituent également un enjeu sociétal des plus importants.

Trois types d'Observatoires sont proposés :

- ▶ Santé humaine : en relation avec l'Insu, CHU, Inserm, Cea, Afssa,.
- ▶ Santé environnementale : en relation avec Ifremer, Inra, Insu, Ird, Afsset..
- ▶ Santé dans les pays du Sud : en relation avec Cirad, Ird, IP, Insu

_Action :

Devant la complexité du paysage Santé et Environnement, par la multiplicité des acteurs et des initiatives, l'atelier propose l'organisation d'une expertise collégiale « environnement, santé et sociétés », dont l'objet portera sur l'identification des acteurs, les domaines et champ d'action, observations et observatoires dont les observatoires privés. Cette expertise collégiale permettra de positionner d'une manière optimale l'INEE sur ce domaine.

Rapporteurs : Marc Lemaire, Martine Hossaert-McKey.

■ Cet atelier a réuni une communauté scientifique assez diversifiée à savoir : trois chimistes travaillant en méthodologie de synthèse, un chercheur travaillant sur la valorisation du bois, 1 chimiste intégrée dans une équipe d'écologie chimique, 1 géochimiste, 12 écologues « chimistes » ou « biochimistes » et un chimiste (pharmacien) des substances naturelles. La faible représentation de cette dernière spécialité (chimie des substances naturelles) a été regrettable d'autant plus que celle-ci se situe clairement à la frontière entre les chimistes de synthèse intéressés par la « chimie verte » et l'écologie chimique.

Contrairement à ce que laisserait penser la similitude de vocabulaire l'écologie chimique et la chimie écologique sont des domaines très différents et les deux communautés n'ont que peu de contact et se connaissent mal. C'est surtout vrai pour les chimistes de synthèse qui disposent d'une très large et très diversifiée communauté. Ils ont, de ce fait, moins tendance à s'ouvrir sur les domaines extérieurs. Une partie de la discussion a en conséquence été centrée sur la définition des différents domaines scientifiques auxquels appartenaient les participants. Ils se regroupent en trois thématiques distinctes mais présentant quand même un certain recouvrement des disciplines.

Restitution de l'atelier

_L'écologie chimique

L'écologie chimique est l'étude du rôle des composés chimiques dans la médiation des interactions biotiques aussi bien en milieu terrestre qu'en milieu marin. Les interactions entre organismes, aux niveaux intra et interspécifiques, se déroulent dans un monde où des molécules organiques dominent comme signaux et comme défenses. L'écologie chimique se trouve donc au cœur des questions fondamentales en biologie évolutive et en écologie fonctionnelle sur le fonctionnement des écosystèmes et sur l'origine et le maintien de la biodiversité. Il s'agit d'un domaine en plein essor, stimulé par les avancées en chimie analytique qui connaît des innovations techniques extraordinaires, permettant de séparer des mélanges complexes pour isoler et identifier les composés individuels, souvent à partir de quantités infimes mais actives au niveau biologique. D'autre part, des avancées conceptuelles

en écologie évolutive et en écologie comportementale ont mis à jour de nouvelles questions sur la médiation chimique. Ces progrès conceptuels sur la médiation chimique portent sur des thèmes tels que l'évolution de la socialité (y compris la reconnaissance de soi et de non-soi), la dynamique de la coévolution, le lien entre spécialisation écologique et spéciation, l'évolution de la coopération, du mutualisme, ou de la tricherie dans la nature, et enfin l'écologie du comportement. De plus, les progrès de la génomique ont ouvert la voie à des études visant à identifier le déterminisme génétique et développemental de la production et de la réception de signaux, permettant de mieux comprendre les contraintes conditionnant l'évolution de la médiation chimique. La compréhension de la mise en place de l'incroyable diversité de la médiation chimique devient ainsi envisageable en croisant pressions de sélection et contraintes fonctionnelles. Pour les chercheurs en écologie chimique, il ne s'agit plus de faire des catalogues d'inventaire des molécules chimiques mais de déchiffrer la 'raison d'être' de ces molécules afin de comprendre les mécanismes associant Biodiversité et Chimiodiversité des écosystèmes. Leurs travaux sont souvent de nature interdisciplinaire les amenant à intégrer des chimistes analytiques au sein de leur équipe et, plus récemment, des biologistes moléculaires.

_La chimie écologique

Souvent appelée « chimie durable » ou « chimie verte » elle comporte deux domaines distincts :

D'une part la chimie durable concerne la mise au point de méthodes de synthèse respectueuses de l'environnement (ou « éco-compatibles »). Les concepts récents qui sont mis en œuvre dans cet axe sont, l'économie d'atome et le facteur E, les principes de la « green chemistry » et du « green chemical engineering », l'analyse du cycle de vie des produits ...

D'autre part mais de façon complémentaire cette chimie durable concerne aussi l'utilisation de ressources renouvelables comme matières premières dont la biomasse, et les agro ressources. Le concept de « bioraffinerie » associé à cette démarche suscite encore de nombreux et importants débats et les avantages et les inconvénients de telles démarches sont encore en cours d'évaluation mais sont déjà un important domaine de recherche académique et industriel.

_La chimie des substances naturelles :

Du fait de la faible représentation de ce domaine et par manque de temps nous n'avons pas pu analyser toutes les potentialités. Néanmoins, il faut déjà signaler que les substances naturelles - avec plus de 200 000 structures actuellement décrites ont été et sont encore une ressource pour les biotechnologies (pharmacie, agrochimie, cosmétique...), mais aussi des outils moléculaires pour l'exploration du vivant et enfin pour la compréhension des interactions biotiques dans les écosystèmes. Les substances naturelles présentent une diversité de structures et une spécificité d'activités biologiques supérieures à celles des produits de synthèse et cette différence est amplifiée si on

compare ces substances aux produits de la synthèse combinatoire. La diversité structurale naturelle est due au nombre de centre chiraux, de groupes fonctionnels, de cycles aromatiques, à la fréquence des hétéroatomes... L'importance des configurations et des conformations des structures tridimensionnelles est considérable pour les aspects biologiques et fonctionnels des substances naturelles. Cette diversité structurale des substances naturelles est le résultat de sélections, au cours des milliards d'années de l'évolution, pour leur rôle biologique et de l'intérêt qu'elles ont ou ont eu pour les organismes qui les produisent, même si ce rôle est encore le plus souvent à découvrir.

Du fait de ces domaines de compétence ces collègues possèdent une culture accessible aux deux autres communautés. A noter que la chimie des substances naturelles trouve une motivation supplémentaire dans l'étude du rôle des métabolites secondaires dans la nature, rejoignant les problématiques de l'écologie chimique.

Les axes émergents dans les domaines de l'écologie chimique et de la chimie écologique

_Ecologie chimique

Plusieurs axes émergents sont à renforcer ou à impulser pour le développement de l'écologie chimique en France faisant, dans la plupart des cas, appel à des approches pluridisciplinaires

- ▶ Etudes des interactions multitrophiques : dépasser les études classiques d'interaction entre 2 espèces pour examiner la complexité du fonctionnement des interactions multitrophiques au sein des communautés.
- ▶ Génomique et écologie chimique : utilisation de techniques de biologie moléculaire (séquençage à haut débit, transcriptomique, métabolomique...) pour relier voies de biosynthèses des médiateurs et leur gènes de régulations et médiation chimique et gènes de réception, dans les processus de spéciation par exemple ou de co-évolution (mimétisme, défenses induites, attraction des partenaires, ...).
- ▶ Ecologie chimique des organismes du sol (eucaryotes et procaryotes)
- ▶ Rapprochement des concepts et des méthodes de l'écologie chimique développés pour les organismes terrestres aux organismes marins, dont la chimiodiversité est encore peu étudiée.
- ▶ Etude de la biosynthèse des métabolites mis en jeu dans les interactions biotiques, étude qui peut être appuyée par la synthèse organique (synthèses biomimétiques).
- ▶ Veille technologique sur les procédés de capture et d'identification.
- ▶ Curieusement la prise en compte de la chiralité des structures de certains « médiateurs chimiques » n'apparaît que très récemment alors que c'est l'un des thèmes majeur de la chimie de synthèse moderne, dû principalement au fait que de nombreux médiateurs

sont des composés à longues chaînes (i.e. >20 et même >30 carbones) et qu'il n'existe pas toujours de méthodes séparatives assez efficaces.

- ▶ Finalement la mise au point de nouvelles méthodes écologiques de lutte contre les nuisibles ou les espèces invasives est un axe de recherche finalisé important (recherche de bio-pesticides par exemple). De plus les méthodes de bio-remédiation issues d'études en écologie chimique et appliquées à la dépollution des sols rejoignent les objectifs de la chimie « durable » visant à réduire les rejets de contaminants.

Certains de ces domaines émergents impliquent des interactions fortes avec les sciences de la vie et les sciences analytiques. Pour d'autres, des compétences importantes sont requises dans le domaine de la synthèse organique. Pour le moment les chimistes de synthèse sont rares et souvent isolés au sein des équipes d'écologie chimique. Un besoin de structuration et d'augmentation d'échelle a été exprimé avec notamment la création de postes (CR et IR) à l'interface des disciplines.

La recherche de nouvelles méthodes de lutte contre les nuisibles plus acceptables du point de vue écologique est un domaine où la coopération entre écologues, analystes, chimistes de synthèse peut trouver de très grandes justifications sociétales et industrielles ; néanmoins des craintes se sont exprimées concernant le recul de la recherche fondamentale sous la pression de ces demandes proches des applications.

_Chimie écologique ou « chimie durable »

Le domaine de la « chimie écologique » a connu un développement récent (formellement la plupart des concepts mis en œuvre datent de moins de 20 ans) mais extrêmement fort. Les réseaux de recherche du CNRS qui s'intéressent à ce domaine implique plus de 200 équipes réparties dans presque toutes les unités de recherche des départements de chimie et de génie des procédés mais aussi de nombreuses équipes de l'INRA, du CEA... Cet engouement correspond à la fois à une demande sociale et à des besoins industriels. Il est stimulé par le durcissement des réglementations européennes (REACH...).

Ces incitations ont induit et induisent toujours le développement de nombreux domaines scientifiques :

- ▶ Les catalyses : de la catalyse hétérogène à la biocatalyse avec une prise en compte de la séparation et le recyclage du catalyseur.
- ▶ De très nombreux nouveaux solvants, de nouveaux réactifs et de nouvelles méthodes d'activation sont proposés pour résoudre des problèmes de sécurité et/ou de déchets.
- ▶ La prise en compte des problèmes d'écologie en chimie de synthèse a aussi conduit à la remise en cause des appareillages traditionnellement utilisés. Pour cela de nouveaux réacteurs et de nouvelles méthodes de séparation sont associés aux nouvelles approches méthodologiques avec comme objectif l'intensification des procédés.

- ▶ La chimie de synthèse qui a été développée au cours du XXe siècle à partir de quelques synthons issus de la pétrochimie (méthane, éthylène...) est maintenant réexaminée en terme d'hémi-synthèse à partir de ressources renouvelables (pool chiral notamment : sucres, lipides, terpènes, alcaloïdes...).

Outils, bases de données, grands équipements

Les laboratoires d'écologie chimique et les laboratoires impliqués dans le domaine de la chimie écologique ont développé leurs propres plateaux techniques. Ces efforts doivent être poursuivis au sein des groupements de recherche avec cependant une spécificité pour les premiers (analyse de traces et d'ultra traces).

Les communautés ont développé des chimiothèques spécifiques, des démarches sont en cours afin de pouvoir les fusionner malgré certaines différences d'objectifs et d'échelles. Les écologues disposent généralement d'échantillons en très faibles quantités, incompatibles avec une utilisation pour des tests biologiques et cette chimiothèque a souvent un caractère « virtuel » pour comparaison. Les chimistes ont eux développé un réseau de chimiothèque associé à des tests biologiques afin d'évaluer les potentiels de molécules originales. Il serait cependant très intéressant de croiser les données de ces deux chimiothèques car même si elles n'ont pas les mêmes objectifs elles peuvent servir de lien pour les scientifiques des deux communautés. Un forum permanent d'échange d'informations et/ou de savoir faire pourrait aboutir à des coopérations fructueuses.

Moyens et actions proposés

- ▶ Les problèmes majeurs sont liés à la faible connaissance du domaine de l'écologie chimique par les chimistes de synthèse. La mise en place d'écoles thématiques « écologie chimique-chimie écologique » semble un outil à privilégier mais elles doivent intégrer les 3 domaines : écologie chimique, chimie des substances naturelles, chimie durable. Ce n'est que par la conjonction de ces trois spécialités que nous pourrions fonder une communauté et encore, il conviendrait probablement d'associer des éléments de sciences analytiques (traces et ultra traces), de toxicologie et d'écotoxicologie.
- ▶ Un appel d'offre en synthèse et en analyse pour l'écologie chimique pourrait être lancé (vide infra « interfaces »), associé à une analyse de la biodiversité des médiateurs chimiques (diversité biologique et diversité moléculaire).
- ▶ Une amélioration importante de la (re)connaissance entre les différentes thématiques pourrait être réalisée par la presse généraliste, journal du CNRS, des sociétés savantes... voire des

rédactions de synthèse commune.

- ▶ Un congrès spécifique pourrait être aussi proposé. Tout du moins il faudrait trouver le moyen de s'informer des congrès/colloques pouvant intéresser les communautés des 3 domaines cités ci-dessus.
 - ▶ Même si de nouvelles coopérations entre équipes de « chimistes » et d'« écologues » (en prenant le domaine principal comme caractéristique) reste souhaitable et possible, l'implantation d'équipe (plusieurs permanents, des étudiants et des thématiques liées aux médiateurs chimiques mais aussi suffisamment autonomes) de chimie de synthèse au sein d'équipe ou d'unité d'écologie chimique nous semble indispensable. Pour le moment des chimistes isolés réalisent un travail de synthèse au sein d'équipe d'écologie chimique. Cette situation ne semble pas satisfaisante compte tenu du besoin, des potentialités et du point de vue des chimistes de synthèse eux-mêmes.
- Une section du CNRS interdisciplinaire incluant les différentes thématiques pourrait aussi être envisagée à plus long terme.

Interfaces disciplinaires et partenariats

Compte tenu des orientations actuelles de la politique scientifique une partie des participants ont exprimés des craintes concernant la possibilité de réaliser des travaux à caractère fondamental. Ce débat (courtois et raisonnable) est fortement induit par les potentiels et les opportunités dans ces domaines. En effet l'agrochimie industrielle est actuellement confrontée à une forte demande sociale de méthodes de lutte contre les nuisibles ou les espèces invasives qui soit plus respectueuses de l'environnement. Bien évidemment l'écologie chimique associée à de la chimie de synthèse (ou mieux l'hémi-synthèse à partir de ressources renouvelables) peut fournir dans de nombreux cas des solutions performantes.

Cette situation est ressentie comme particulièrement attractive par une partie des communautés et avec un peu de méfiance par une autre, en outre cette thématique devrait faire l'objet de fortes interactions avec d'autres organismes (INRA...).

Une des solutions pourrait passer par la création d'un réseau de recherche spécifique à l'image de ce qui a été fait ces dernières années dans le domaine de la chimie durable (en incluant des industriels Bayer Crop science, Merial...).

Il serait sans doute efficace de lancer un appel d'offre spécifique de l'ANR incluant une part importante de fondamental dans les domaines émergents mais aussi des thèmes plus finalisés.

Compte tenu des enjeux importants pour l'agriculture et l'environnement, des relais européens existent déjà et devront se développer.

Les communautés intéressées

Au CNRS, les communautés intéressées par ce domaine de l'écologie chimique – chimie écologique sont essentiellement :

- ▶ les sciences de l'écologie et de l'environnement : écologie, évolution, écologie fonctionnelle, écologie comportementale, écologie des communautés, la génomique des voies de synthèse et des récepteurs sensoriels,...
- ▶ les sciences de la chimie : chimie analytique, chimie de synthèse, chimie durable ...
- ▶ l'étude des substances naturelles et criblages biologique et physico-chimique, ...
- ▶ les sciences sociales : usage et savoirs, biodiversité culturelle, droit des communautés

Elles concernent donc les Instituts de l'INEE, de INSB, de INC et de INSHS.

Au plan national, des rapprochements forts sont à envisager avec l'INRA dans le département Santé des Plantes et Biologie des Populations et des Ecosystèmes, et le CEA. Les thématiques développées par notre communauté sont aussi au cœur des priorités de la FRB en couplant des recherches sur la biodiversité et chimiodiversité des écosystèmes.

Positionnement national et international

La communauté des scientifiques travaillant dans ce domaine est regroupée en France pour le domaine terrestre dans le GDR Ecologie Chimique GDR 2827, regroupant 14 laboratoires et, pour le domaine marin, un GDR a été créé en mai 2009, le GDR BioChiMar (Biodiversité et Chimiodiversité Marines). Le GDR d'Ecologie chimique qui regroupe des chercheurs du CNRS, de l'INRA et de diverses universités françaises est bien reconnu dans le domaine de l'écologie chimique des interactions biotiques et surtout pour la dimension évolutive qu'il apporte dans ce domaine de recherches. Au niveau international, il existe une Société Internationale d'Ecologie chimique (ISCE) créée depuis 1983. Ces dernières années, les équipes françaises participent activement à l'animation de cette société et assistent régulièrement aux réunions annuelles organisées sous forme de Congrès. Ce congrès international sera d'ailleurs organisé à Tours en 2010, par l'IRBI (Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte) et le GDR Ecologie Chimique. Les équipes françaises publient aussi régulièrement dans les deux revues internationales consacrées à cette discipline : The Journal of Chemical Ecology et Chemical Ecology.

La chimie est souvent mal perçue en raison des problèmes de pollution qu'elle a pu engendrer.

Les préoccupations de l'opinion, des élus et des décideurs à propos de la santé, de la qualité de l'environnement et, plus généralement, du développement durable, conduisent donc l'Industrie comme la Recherche Académique à s'engager dans une révision radicale des modes de conception, de production, d'utilisation et d'évaluation des ressources chimiques.

Le règlement européen REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals, entré en vigueur en Juin 2007, qui impose l'établissement de données très précises sur les propriétés chimiques, les effets toxicologiques et l'impact sur l'environnement de toute nouvelle molécule avant sa mise sur le marché modifie complètement la vision et l'avenir de la Chimie. Cette réglementation constitue en effet un formidable appel pour la recherche puisqu'elle va conduire à concevoir un grand nombre de produits de substitution, aux effets sur l'homme et l'environnement plus explicites et mieux contrôlés. C'est d'ailleurs une des questions (substitution et innovation chimique) qui a été posée lors du Grenelle de l'Environnement. Ainsi la Chimie prend une part de plus en plus importante dans l'écoconception (tant au niveau national qu'international), thématique interdisciplinaire intégrative par essence, qui aujourd'hui se révèle comme très importante économiquement et qui est étroitement liée à une démarche globale prenant en compte dès le début des filières des produits recherchés, toutes les contraintes écologiques et tous les enjeux de durabilité. A ce titre le règlement REACH joue un rôle moteur très puissant dans la mise en œuvre de l'écoconception (avec en appui les recommandations du Grenelle de l'Environnement sur le principe de Substitution).

L'enjeu central est donc de construire une recherche fondamentale forte et interdisciplinaire contribuant au développement d'une Chimie intégrant pleinement la notion de Durabilité. Cette démarche accompagne en amont la prise de conscience de la nécessité d'une Chimie « pensée autrement », respectueuse de l'environnement, véritable Chimie Ecologique. Cette démarche intégrative a aussi pour objectifs de construire à la fois une relation apaisée de cette Science avec la Société et de contribuer à la mise en place de conditions efficaces pour une Innovation réussie au niveau industriel, primordiale pour notre Economie où la Chimie prend une part majeure

Restitution de l'atelier

Toute évaluation environnementale exige, outre la prise en compte explicite des systèmes écologiques, l'intégration des dimensions sociale, économique et culturelle. Tel fut le postulat de départ de l'atelier 7 auquel se sont ralliés les participants (35) avant de discuter à proprement parler de 'prospective'. Puis dans le but de cadrer au mieux les enjeux de la recherche sur les thématiques de l'évaluation environnementale, de la gestion et de la remédiation, il a été choisi d'initier les échanges en partant des connaissances des juristes qui n'ont cessé d'affirmer combien les textes étaient en fait assez ambitieux par rapport aux instruments actuels dont disposent les chercheurs et les gestionnaires. La référence aux textes juridiques a ainsi permis de prendre conscience du décalage entre les attentes de la société et l'état des connaissances scientifiques actuelles et ainsi de proposer de nouvelles thématiques de recherche ou encore d'apporter quelques précisions sur les possibles améliorations des outils actuels. L'atelier s'est ainsi proposé de répondre aux questions soulevées par les textes juridiques reflétant en quelque sorte les ambitions des gestionnaires du territoire. Le territoire est ici abordé indépendamment de toute référence à une échelle spatiale particulière et de ce fait il concerne aussi bien la parcelle que l'unité paysagère.

Les référents de la réflexion scientifique: Les notions juridiques d'« état initial » et de « services rendus par les écosystèmes »

Notion omniprésente dans le droit de l'environnement, l'évaluation participe d'une approche préventive et curative. Elle permet d'apprécier en amont les incidences environnementales de certains projets d'ouvrages publics ou privés, de certains plans et programmes et les risques présentés par des substances et produits chimiques ou en contenant. Elle porte également sur certains dommages et atteintes significatives portés à certaines espèces et habitats protégés, à l'eau et aux sols. Ces obligations juridiques d'évaluation s'inscrivent dans le moyen terme justifiant si besoin une révision des plans, programmes, schémas sectoriels et autorisations administratives d'exploitation et/ou de mise sur le marché sur la base de nouvelles connaissances.

_Les notions d'« état initial » ou d'« état écologique de référence »

Certaines de ces législations concernant les évaluations des incidences environnementales mentionnent la notion d'état initial, sans toutefois l'explicitement préciser. Dans la directive 2004/35/CE sur la responsabilité environnementale, la notion d'état initial est définie de la manière suivante :

« L'état des ressources naturelles et des services, au moment du

Rapporteur : Cynthia Ghorra-Gobin.

dommage, qui aurait existé si le dommage environnemental n'était pas survenu, estimé à l'aide des meilleures informations disponibles ».

Il est en outre précisé que les détériorations causées aux espèces et habitats visés

« ... s'apprécient par rapport à l'état de conservation des habitats ou des espèces au moment de la manifestation du risque ou de la réalisation du dommage en tenant compte de données mesurables ».

L'application effective de ces mécanismes juridiques d'évaluation suscite de nombreuses interrogations concernant (1) la pertinence des indicateurs structurels et fonctionnels (2) la disponibilité des connaissances et (3) les modalités de renforcement des recherches interdisciplinaires. Aussi l'appréciation de l'« état initial », de l'« état référentiel » ou encore de l'« état écologique de référence » exige la mise en place systématique de dispositifs d'inventaires, de suivi et de surveillance temporelle et de méthodologies/outils adaptés.

_Mesurer la notion de « services rendus par les écosystèmes »

Outre la notion d'« état initial », les juristes ainsi que les gestionnaires notent deux autres difficultés :

- 1- L'appréciation de la notion de « services rendus par les écosystèmes ».
- 2- et le coût de l'évaluation environnementale ainsi que celui de la réparation des dommages environnementaux.

Utile de signaler que le principe de « services rendus par les écosystèmes » qui figure dans la directive sur la responsabilité environnementale, est susceptible d'être repris par d'autres textes, d'où l'intérêt de s'y attarder. Il mérite une grande attention de la part des chercheurs, des économistes et des décideurs.

La thématique du coût de l'évaluation environnementale ainsi que celui de la réparation des dommages environnementaux bien que fort importante n'a pu être véritablement discutée en raison de l'absence d'économistes au sein de l'atelier. Le débat s'est ainsi engagé sur les modalités à suivre pour enrichir la recherche sur les thématiques (1) de la remédiation et de la phytoremédiation, (2) sur les charges critiques et (3) sur l'évaluation de l'intégrité fonctionnelle des écosystèmes.

_De la 'remédiation' et de la 'phytoremédiation'

Un certain nombre de techniques de remédiation par exemple de sols contaminés existent et sont largement utilisées, y compris des techniques ménagées respectueuses de l'environnement, comme celles

utilisant des microorganismes. Ces techniques ne permettent pas toujours d'éliminer complètement la pollution. Il reste une « pollution résiduelle » et des terres à impact environnemental non négligeable à gérer.

Elaborer la notion de « filières de traitement »

Les techniques ménagées utilisant les microorganismes et les plantes sont à développer, et de nouvelles recherches sont encore nécessaires pour améliorer la connaissance des mécanismes impliqués afin de les contrôler. La notion de « filières de traitement » doit être développée : par exemple pour la phytoextraction de métaux toxiques. Il revient d'optimiser l'extraction par les plantes tout en y associant la gestion et la valorisation de la biomasse polluée produite. Il faut aussi associer des scientifiques et des économistes pour prendre en compte la notion de faisabilité et d'acceptabilité des techniques de traitement.

_Développer la phytoremédiation dans le sens d'une phytostabilisation

La phytoremédiation des sols contaminés par les métaux pourrait être d'avantage développée en Europe dans le cas des sols moyennement ou faiblement contaminés et dans le cas des sols dans les enceintes des entreprises toujours en activité. Plusieurs atouts sont en effet à mettre en avant comme l'impact visuel positif et la réduction de l'envol des particules de sol. On parle ici de phytostabilisation. Les associations de plantes et les cultures en plein champs de longue durée ont très peu été étudiées alors que des mécanismes de synergie et la cinétique de minéralisation des phases porteuses de métaux pourraient accroître l'efficacité de la phytoextraction et réduire ainsi les durées de traitement qui sont le point faible de cette technique.

Concernant la gestion des terres excavées il apparaît légitime que les entreprises en charge de grands chantiers souhaitent valoriser ces terres qui sont actuellement considérées comme des déchets. Cependant une étude de spéciation des métaux devrait au préalable être menée afin de compléter l'information sur les concentrations totales en métaux de ces terres et de renseigner ainsi leur potentiel de dangerosité.

La recherche sur les thématiques de la remédiation ne concerne pas uniquement les scientifiques. Elle exige également d'associer des économistes pour prendre en compte la notion de faisabilité et d'acceptabilité des techniques de traitement.

Sols et « Charges critiques »

Protéger les sols situés à l'interface entre atmosphère-biosphère-géosphère, constitue également un enjeu important de l'évaluation environnementale et de la remédiation. Le concept de « charges critiques », un indicateur permettant de quantifier la sensibilité des écosystèmes aux apports de contaminants atmosphériques, et en limiter les apports, s'avère pertinent et est reconnu en tant que tel au niveau mondial.

_Le concept de « charges critiques »

La notion de « charges critiques » se définit comme la « valeur d'exposition à un ou plusieurs contaminants en dessous de laquelle des effets significatifs indésirables sur des composantes sensibles de l'écosystème n'apparaissent pas, en l'état actuel des connaissances » (Nilsson et Grennfelt, 1988). Mis en place au niveau européen au début des années 90 pour limiter la pollution atmosphérique acide soufrée et azotée transfrontalière à longue distance dans le cadre de la Convention de Genève, le concept a été ensuite appliqué par le biais de différents modèles aux autres contaminants comme les métaux ou l'azote eutrophisant. Les stratégies de réduction des émissions de polluants prônées par la convention sont basées sur la prise en compte de leurs effets indésirables sur la santé, les écosystèmes et les monuments historiques. La France comme les autres pays signataires et aujourd'hui les USA, le Canada et la Chine ont adopté ce concept.

A l'issue du protocole de Göteborg (horizon 2010), visant à limiter les plafonds d'émissions notamment responsables de l'acidification et de l'eutrophisation, les niveaux d'azote acceptables seront toujours dépassés sur l'ensemble de l'Europe. L'enjeu est aujourd'hui de s'investir dans une démarche de détermination de charges critiques cibles en polluants « idéales et non contraignantes » à échéance 2050 («non-binding aspirational target loads for 2050»). Il s'agit de déterminer les charges en polluants à ne pas dépasser, compte tenu de la sensibilité des écosystèmes, et de leurs potentialités de restauration à une échéance lointaine. Outre l'azote, il en est de même pour certains métaux, notamment les «métaux-émergents», pour lesquels la sensibilité des écosystèmes reste inconnue.

Les charges critiques pour les différents polluants atmosphériques considérés doivent être régulièrement évaluées et cartographiées pour chacun des pays signataires dans le cadre du Programme International de Coopération sur la Modélisation et la Cartographie à l'échelle européenne.

_Spatialiser les « charges critiques »

La spatialisation des charges critiques au niveau national est un enjeu fort. Elle nécessite le développement de recherches portant sur la détermination : (i) d'indicateurs pertinents vis-à-vis de différents contaminants, (ii) de limites critiques, (iii) des interactions entre polluants,

(iv) des interrelations entre, d'une part les pollutions atmosphériques et, d'autre part, le changement climatique et la biodiversité, (v) des méthodes de spatialisation, ainsi que (vi) sur la prise en compte des incertitudes dans les étapes de modélisation.

Déterminant aussi d'associer les recherches sur les transferts des éléments et les impacts écotoxicologiques de façon à déterminer les limites critiques tolérables pour les écosystèmes surtout en milieu faiblement contaminé. Pour la pollution azotée, les priorités concernent l'impact sur la biodiversité et la mise au point de modèles couplés biogéochimie-phytoécologie. Concernant les métaux, des limites critiques devraient être définies sur la base de recherches en écotoxicologie, et des méthodologies de modélisation à l'état stationnaire ou dynamique devraient être développées.

Les charges critiques peuvent être appliquées à des apports aux sols de contaminations diffuses autres que la pollution atmosphérique (intrants agricoles, notamment). La détermination de la sensibilité des écosystèmes *sensu lato* ainsi que celle des zones Natura 2000 vis-à-vis des entrées diffuses de contaminants, est fondamentale pour quantifier leur degré de dégradation et assurer leur protection.

Evaluation de l'intégrité fonctionnelle des écosystèmes

Le choix judicieux d'indicateurs et de métriques est un point crucial de l'évaluation environnementale, dans l'optique de suivre l'évolution d'un écosystème et/ou d'évaluer le succès d'une opération de restauration écologique.

_Des indicateurs de l'intégrité fonctionnelle des écosystèmes

Les indices biocénétiques sont largement utilisés pour caractériser les communautés biologiques et en inférer l'état écologique des milieux naturels. De nombreux descripteurs physico-chimiques sont également utilisés à des fins de diagnostic environnemental. Toutefois, parallèlement à ces indicateurs de structure, il est primordial de proposer des indicateurs pertinents de l'intégrité fonctionnelle des écosystèmes.

De tels indicateurs sont basés sur des processus écosystémiques et peuvent par exemple concerner la production primaire, la dénitrification, la bioturbation des sols et des sédiments ou encore les processus de dégradation des litières végétales. Outre leur caractère synthétique et leur applicabilité dans des contextes très variés, ces indicateurs ont l'avantage d'être en lien direct avec la notion de « services rendus par les écosystèmes » désignée par les textes juridiques.

_Etablir des conditions de référence

Afin de proposer des indicateurs basés sur des processus écosystémiques, il importe que les processus évoqués soient étudiés dans des conditions de référence préalablement définies et, en parallèle, dans des conditions altérées par des contaminants chimiques, par des modifications physiques de l'environnement (pollution thermique,

modification hydrologique...), et/ou par des invasions biologiques. Il sera ainsi possible de définir l'impact de telles altérations sur l'intensité des processus étudiés. Cette approche est par nature interdisciplinaire puisque, en fonction des processus retenus, elle pourra nécessiter la collaboration d'écologues, de microbiologistes, de biogéochimistes, de modélisateurs, etc. Par ailleurs, la mise en relation de l'intégrité fonctionnelle et des « services écosystémiques » devra bien entendu s'appuyer sur l'expertise issue des sciences économiques et sociales.

Conclusion

Tout en proposant la quête d'indicateurs pertinents pour procéder à l'évaluation environnementale et le souci d'établir des conditions de référence dans une optique interdisciplinaire (paramètres physico-chimiques et dimension paysagère), les chercheurs ont insisté sur l'impératif d'un travail s'inscrivant dans une perspective universelle prenant ainsi en compte les exigences des instances internationales et européennes. Ce qui suppose des liens étroits avec des chercheurs étrangers travaillant dans d'autres contextes nationaux.

Par ailleurs, ils n'ont cessé de revendiquer l'impératif d'une spatialisation des données. Mettre au point des indicateurs à partir d'une connaissance centrée sur les molécules ne représente qu'une étape de la recherche qui exige également de prendre en compte de manière pertinente différentes échelles territoriales allant de la parcelle de terrain à l'unité paysagère. D'où le souci d'une spatialisation des données autorisant à terme une meilleure prise en compte des enjeux écologiques, sociaux et économiques de toute politique de remédiation.

Communautés concernées

Les problématiques soulevées lors de l'atelier se situaient à l'interface sciences exactes/sciences humaines et sociales. D'où l'intérêt du débat pour une discipline comme la géographie dont l'une des ambitions est de territorialiser ou encore spatialiser des enjeux mis en évidence par différentes disciplines. Les échanges et débats concernant la prospective ont privilégié la demande sociale comme référentiel principal. Aussi les communautés concernées par cet atelier sont certes les biologistes, les chimistes, les écologues et les physiciens mais dans le but de répondre avec pertinence aux enjeux de sociétés tels qu'ils sont étudiés par les sociologues, politologues et juristes.

Positionnement national et international

Les débats ont pris comme point d'ancrage les textes juridiques français et européens. Toutefois le questionnement des chercheurs a souligné en permanence l'intérêt d'une mise en commun avec des chercheurs travaillant dans des laboratoires étrangers. Il a été noté que plusieurs pays avaient mis en place des systèmes de suivis récurrents de milieux représentatifs et qu'à ce jour rien d'équivalent en France.

Partenariats avec les autres instituts ou autres établissements de recherche

Compte tenu du caractère transdisciplinaire des enjeux de société, il paraît urgent de maintenir des liens et d'établir des partenariats avec d'autres ateliers au sein de l'INEE ainsi qu'avec des équipes au sein de l'INSHS, CEMAGREF, IRD et INSU.

Outils, priorités et pistes d'actions

Imaginer l'invention de structures souples autorisant un travail de recherche mené conjointement avec des chercheurs étrangers, notamment européens afin de disposer de moyens et d'outils scientifiques en mesure de répondre aux attentes des sociétés.

Un axe de travail doit être également engagé entre sciences de l'environnement et sciences humaines et sociales sur la notion de « compensation » dont la complexité ne relève pas uniquement d'une simple question juridique. En effet comment appréhender dans nos sociétés le principe de la compensation sans y inclure les notions de 'justice sociale', 'justice spatiale' et 'équité'.

Rapporteurs : Nicolas Buclet, Amy Dahan.

Restitution de l'atelier

Les travaux scientifiques propres à l'INEE ne peuvent aujourd'hui se départir d'une réflexion autour de la problématique du développement durable. Bien que d'origine politique, cette problématique intéresse un nombre croissant de chercheurs au niveau international⁵, avec comme mérite un regain d'intérêt pour la relation de l'homme avec son environnement, et en tant que partie de cet environnement⁶. Comme le souligne Patrick Viveret⁷, les préoccupations écologiques et de bien-être ne doivent plus être considérées comme un luxe réservé aux sociétés occidentales.

Les conséquences sociales de la problématique écologique touchent en profondeur l'existence de l'ensemble des populations de la planète. D'un point de vue scientifique, la problématique du développement durable est étroitement liée au questionnement des conceptions et philosophies de la nature, aux enjeux éthiques et épistémologiques qui y sont associés et à ce que cela implique du point de vue de la technicisation de notre environnement⁸.

L'existence de ces enjeux éthiques et épistémologiques est source de tensions entre orientations, réflexions et recherches.

Ces tensions sont elles-mêmes souvent le résultat d'une volonté exprimée par la société de résoudre au plus vite les problèmes qui se posent, tout en considérant que les solutions proposées doivent se fonder sur une expertise scientifique de qualité. Cette volonté n'est pas exempte de contradictions.

Il est possible d'identifier certaines de ces *tensions*, qui sont autant d'enjeux en termes de structuration de la connaissance scientifique. En effet, il faut souligner que les tensions ont un caractère "objectif" et récurrent, au sens qu'on ne peut prétendre les résoudre prématurément sous peine d'ignorer des dimensions importantes des problèmes ; de plus toute solution d'une tension est un compromis entre ses deux pôles, un compromis valable à un moment donné mais toujours susceptible de révisions. On peut énumérer sept tensions majeures :

1. Compréhension versus action

Le souci d'une compréhension plus fine du fonctionnement des écosystèmes locaux dans leur diversité et leur complexité (jamais épuisée), l'évaluation précise des services écologiques qu'une bonne compréhension pourrait permettre, appellent un temps long et s'opposent aux contraintes sociétales nécessitant une orientation plus opérationnelle de cette connaissance afin de guider les changements souhaités. Par ailleurs, il faut savoir que les écosystèmes ne sont

jamais étanches, qu'on ne les comprendra jamais isolément et que bien souvent il est plus facile de les protéger (ne pas les détériorer) que de les comprendre. La tension, compréhension versus action, est donc une tension entre le temps de la recherche et le temps de l'intervention ou de l'action. Il paraît important pour l'INEE de préserver la capacité des chercheurs de mener des programmes dans la durée.

2. Local versus global

L'articulation entre le niveau local et le niveau global de réflexion et d'étude est particulièrement difficile. Une analyse et une pratique à l'un de ces deux niveaux entraînent inévitablement un risque d'oubli des problématiques propres à l'autre. Or, les enjeux pour les acteurs concernés et leur environnement ne sont pas les mêmes. On peut ainsi discuter de stratégie de changement en dessaisissant les acteurs locaux. Développer des travaux permettant des passerelles entre les deux niveaux —local et global— paraît d'une importance stratégique pour atténuer cette tension.

3. Logiques disciplinaires versus injonction d'interdisciplinarité

La recherche est soumise également à d'autres tensions, telle que la nécessité des approfondissements disciplinaires qu'il faudrait coupler avec l'injonction interdisciplinaire présente dans de nombreux appels d'offres, ou encore l'affrontement entre cette même injonction interdisciplinaire et les pratiques en matière d'évaluation disciplinaire des travaux scientifiques. Il nous semble que ce n'est qu'au prix d'une meilleure prise en compte des travaux interdisciplinaires que l'on pourra espérer motiver les chercheurs en ce sens.

4. "Economiciser" la Nature versus Ecologiser la Société

Cette tension renvoie à deux attitudes épistémiques prenant des points de départ assez différents. Un certain nombre de travaux ont tendance à vouloir « economiciser » la nature, au sens d'évaluer du point de vue du marché les services qu'elle peut rendre (par exemple : évaluation monétaire de la biodiversité). Cette tendance est d'autant plus forte qu'elle est portée par la discipline hégémonique que représentent les sciences économiques. D'importants travaux ont été dès lors développés en ce sens. Une tendance opposée, qui consisterait à vouloir écologiser la société (écologie industrielle et territoriale, ingénierie écologique...), c'est-à-dire considérer que les sociétés humaines gagneraient à s'inspirer du fonctionnement des écosystèmes et à se sentir partie prenante de ces écosystèmes, peut être tout aussi riche en enseignements. Tant l'écologie industrielle et territoriale que l'ingénierie écologique représentent en ce sens des champs d'investigation prometteurs, notamment si l'on souhaite sortir d'une vision moins déterministe de la relation de l'homme avec ce qui l'entoure pour embrasser une vision plus systémique des phénomènes tant environnementaux que sociaux.

⁵ Voir par exemple le succès de la « Annual International Sustainable Development Research Conference » dont la 15^{ème} édition s'est tenue à l'Université d'Utrecht en juillet 2009

⁶ Schaeffer J-M. 2007. La fin de l'exception humaine. Gallimard. Paris.

⁷ Patrick Viveret. 2008. Reconsidérer la richesse. Editions de l'Aube. La Tour d'Aigues

⁸ Voir Amy Dahan & Florence Pinton, "De la nature au Système Terre, environnement et durabilité", Sciences et Devenir, Les Cahiers du MURS, n° 57/58, 3^e trimestre 2008, p 28-43.

5. Souci de gouvernance versus attitudes prescriptives

Une tension, riche en enjeux scientifiques, est également perceptible entre des tendances récentes fortes en sciences sociales, soucieuses d'investiguer les formes nouvelles de gouvernance (démocratie, participation, ...) et de comprendre les diverses logiques des acteurs, et les recherches s'intéressant aux moyens de favoriser des attitudes prescriptives et normatives. Ici, le développement durable est pris à un pôle comme un véritable objet politique qui doit arbitrer des soucis environnementaux, des préoccupations économiques, et des exigences de justice sociale et d'équité Nord-Sud ; à l'autre pôle, la durabilité est une prescription politique directement normative. On retrouve ici sous une autre forme la tension déjà mentionnée entre la compréhension et l'action. Les questions de gouvernance nécessitent des éléments de traduction, où l'expertise est pleinement mobilisée. Il serait judicieux de favoriser des travaux qui, à partir des investigations accomplies, s'interrogent sur les enseignements que peuvent en retirer les acteurs concernés. Une coopération forte de l'INEE avec l'INSHS apparaît nécessaire sur ce point.

6. Durabilité des pratiques versus adaptabilité

La conception même de la durabilité trouve un écho dans des conceptions assez différentes de la relation à la technique. D'un côté, les travaux scientifiques épousent le concept de durabilité forte et s'interrogent avant tout sur la durabilité des pratiques et des ressources disponibles, là où les partisans d'une durabilité faible considèrent avant tout l'existence d'enjeux en termes d'adaptabilité technologique. Les enjeux scientifiques, à notre sens, appellent des travaux capables de faire interagir ces deux concepts, là encore en adoptant une démarche systémique.

7. Pluralité versus identités (emboîtées)

La reconnaissance de la pluralité des valeurs d'accès au réel se retrouve en tension avec les considérations quant à l'existence d'identités (citoyennes) ou de savoirs emboîtés. Comment arbitrer entre des représentations diversifiées où chacun catégorise son environnement, et le fait que chaque individu est à la fois producteur, consommateur, pollueur ou autre chose ? Les réponses de type forum hybride, parlement de la rivière, etc., sont ici à explorer.

Communautés concernées

De par la composition de l'atelier tenu à Rennes, les problématiques soulevées ont été davantage guidées par les sciences humaines et sociales. Néanmoins, la présence de chercheurs des sciences de l'environnement, notamment en écologie, ont permis aux discussions de mettre en évidence un certain nombre d'interactions profitables et nécessaires avec d'autres champs disciplinaires parmi lesquels nous citerons de façon non exhaustive l'écologie, la chimie, la biologie, l'agronomie. Cela indique un besoin important d'interdisciplinarité forte,

non seulement au sein de l'INEE, mais en lien avec des chercheurs et des équipes de l'INC, de l'INSHS, mais aussi d'institutions hors CNRS telles que l'INRA, le CIRAD, le CEMAGREF et l'IRD. Ce besoin d'interdisciplinarité gagnerait à être organisé à partir de questionnements scientifiques requérant une approche systémique. C'est en effet face à la complexité de tels questionnements que les besoins d'inter et pluridisciplinarité se font sentir par les chercheurs mêmes.

Positionnement national et international

Les questions ont été amplement débattues avec, comme référence implicite, un contexte institutionnel national (évaluation de la recherche interdisciplinaire, temps de la recherche versus temps de l'action). En revanche, les discussions quant aux thématiques scientifiques abordées montrent que les travaux sont à considérer à un niveau international. C'est notamment le cas des disciplines émergentes que constituent l'ingénierie écologique ou l'écologie industrielle et territoriale, ce dernier champ étant particulièrement peu développé en France, comparé au contexte européen, nord-américain et asiatique. Il paraît important de parvenir à combler cette faible visibilité internationale, phénomène également perceptible dans les sciences humaines et sociales, notamment sur les questions de gouvernance.

Partenariats avec les autres instituts ou autres établissements de recherche

Au-delà des diverses communautés concernées déjà mentionnées, le partenariat avec l'INSHS, mais aussi les institutions comme l'INRA, le CIRAD, ou l'IRD, est essentiel pour prendre en compte les nombreux enjeux politiques des questions de durabilité en lien avec les usages : épuisement de sols, de ressources, gestion optimale des forêts, de l'eau etc. Ces deux derniers organismes en particulier mettent au centre de leurs programmes les inégalités Nord-Sud et les questions d'équité ou de responsabilité historique ; il paraît important que les chercheurs et les équipes de l'INEE ne se situent pas à l'écart de tels enjeux.

Outils, priorités et pistes d'actions

Il nous semble qu'une des priorités en matière de meilleure appréhension scientifique des questions de durabilité est de favoriser le partage le plus large possible d'une vision systémique des questions à traiter. En effet, trop souvent les études mais aussi les actions se fondant sur une évaluation monocritère aboutissent à des résultats contreproductifs pour de nombreux autres critères non pris en compte. Afin de favoriser et de partager cette vision systémique, il pourrait être pertinent de favoriser des actions de formation à la démarche systémique, prise de façon globale. A côté de cela, il nous semble que certains champs disciplinaires, telle que l'ingénierie écologique, ou l'écologie industrielle et territoriale, eux-mêmes fondés sur une compréhension

systémique de la relation homme-nature et sur une action fondée sur cette compréhension systémique, gagneraient à être favorisées.

Nous pensons que c'est au sein de ces champs que peut être fait le lien entre la société et l'écologie, ceci de plusieurs façons :

- ▶ Un rapprochement entre l'ingénierie écologique, au sein de laquelle se retrouvent davantage des chercheurs en sciences de l'environnement (biologie, écologie, agronomie) et l'écologie industrielle et territoriale paraîtrait constructif, notamment afin de mieux comprendre où peuvent se situer les passerelles entre le fonctionnement systémique des écosystèmes dits naturels et le fonctionnement des sociétés humaines en interaction avec celui-ci. Il s'agit là de répondre à l'une des sept tensions évoquées ci-dessus (tension numéro 4) et de comprendre en quel sens il serait possible « d'écologiser » les sociétés humaines. En ce sens un rapprochement des deux communautés permettrait de dégager d'intéressantes pistes de réflexion pour les années à venir. Pour ce faire, nous suggérons que se développent des initiatives en termes de formation et de programmes de recherche sur ce thème.
- ▶ Une école thématique pourrait être organisée afin de permettre aux chercheurs des deux communautés de réfléchir à cette question de l'intérêt de tenir compte du fonctionnement des écosystèmes dans celui des sociétés humaines. De cette école thématique devraient pouvoir resurgir des pistes de programmes de recherche à mener sur la question ;
- ▶ Ces deux champs disciplinaires ont également pour particularité de tenter de faire le lien entre la nécessité de prendre en compte les préoccupations d'ordre global et celle d'agir à un niveau local (tension numéro 2). En écologie industrielle et territoriale un certain nombre de méthodes sont déjà développées d'un point de vue conceptuel (analyse du métabolisme d'un territoire à l'aide notamment de l'analyse des flux de matière et d'énergie, détermination de l'empreinte (aquatique, alimentaire, énergétique...) d'un territoire au-delà de son périmètre) mais nécessitent encore des travaux importants. En relation avec la volonté de l'INEE de développer une meilleure connaissance des nouveaux « biomes », un travail en particulier autour de la ville durable (en lien avec les résultats à venir du RTP « Villes Durable » que l'INEE a souhaité monter) permettrait de privilégier un espace particulièrement riche, système hautement anthropisé, mais également système nécessitant des interactions fortes avec des territoires extérieurs et avec lesquels s'échangent des flux humains, matériels et cognitifs. Ce travail autour de la ville durable en lien avec les outils et méthodes de l'écologie industrielle et territoriale, entendue dans un sens large et en connexion avec le reste de la biosphère, pourrait s'inscrire autour de problématiques propres à de nombreuses disciplines (sciences de l'environnement pour la partie concernant une meilleure connaissance du métabolisme

des villes et des méthodes à employer pour mieux cerner l'impact d'une ville sur l'écosystème et sur d'autres « écosystèmes sociaux » ; sciences sociales pour la partie de coordination et d'interaction entre les acteurs partie prenante du système (en lien avec la tension 7) mais également de définition collective des objectifs de développement territorial en cohérence avec les contraintes écosystémiques de la biosphère (souci de gouvernance en lien avec la tension 5) ; approche historique des villes et de l'influence des modes d'organisation des activités humaines sur l'impact de l'homme sur son environnement (en lien avec la tension 6 sur la durabilité des pratiques) ; sciences de l'ingénieur afin de faire le lien de ces différents aspects avec l'importance des réseaux (eau, énergie, transports...) existants et à définir. Il paraît pertinent, tant par de futurs appels d'offre (dans le cadre du PIRVE mais non exclusivement) que par des efforts de formation (écoles thématiques autour de la ville durable), d'accroître la sensibilité de nombre de chercheurs à l'importance de traiter de façon systémique cette question de la ville et de ses interactions avec son environnement.

Afin d'y parvenir, nous suggérons par ailleurs de soutenir la création de réseaux internationaux de chercheurs sur une question également d'actualité, non seulement en Europe, mais également aux Etats-Unis ou en Asie.

Le financement de workshops internationaux permettant aux chercheurs français de mieux se confronter aux avancées de leurs collègues internationaux sur les multiples questions des villes durables, devrait être profitable aux efforts de recherche en la matière. Le droit à l'expérimentation doit également être souligné dans un tel domaine, ceci dans un souci de résorption partielle de la tension n°1 entre le temps de la compréhension et le temps de l'action.

■ Positionnement de l'atelier

L'Institut Ecologie et Environnement est né dans un contexte particulier qui place la biodiversité au cœur des grands enjeux scientifiques de l'écologie. Quelle(s) diversité(s) est-il nécessaire de préserver pour que la biosphère terrestre reste un système viable ? Le contexte est difficile car une période d'érosion de la diversité, la sixième depuis 600 millions d'années, est engagée, et elle est due à l'action d'une seule espèce, la notre. Le contexte est difficile aussi, parce que la science, basée fortement sur l'idée que la Physique est le « socle fondamental » de sa branche naturelle, s'est très peu préparée à affronter ce problème. D'une part l'approche réductionniste atteint rapidement ses limites quand les systèmes étudiés deviennent complexes (il faudra donc dépasser ces limites) et d'autre part, les fondements même de la physique, malgré les progrès techniques fulgurants réalisés au cours du 20^e siècle, ne parviennent pas à expliquer les origines de la vie et les déterminismes profonds de l'évolution du vivant.

L'étude des liens étroits entre la diversité du vivant, l'évolution et le fonctionnement de la biosphère requiert de nouvelles théories qui pourront être testées non seulement au travers d'observations, mais aussi et surtout au travers d'expérimentation directement réalisable sur des écosystèmes naturels ou artificiels. Si l'observation permet et permettra d'identifier les patrons de la diversité, et parallèlement de certains états des écosystèmes, et même si elle est guidée par l'étude des propriétés des systèmes étudiés, son pouvoir explicatif est faible, et sa capacité prédictive est nulle (ou s'apparente à un exercice divinatoire). Seule l'expérimentation, réalisée en étroite liaison avec la modélisation mathématique, et donc en conditions de contrôle optimal, offre de telles perspectives.

Les outils de l'observation

Les grands défis sont d'une part l'inventaire de la diversité et d'autre part la surveillance (au sens anglo-saxon de « monitoring » plutôt que de « survey ») de la biosphère. L'inventaire des espèces est une course contre la montre, lente et difficile. Des espèces disparaissent vraisemblablement sans qu'elles n'aient pu être identifiées, classées, et étudiées. L'effort est considérable et requiert la mise en place de grandes plateformes de génotypage et de phénotypage, telles que celles qui se mettent en place en France (Génoscope) ou aux Etats-Unis (JGI). La quantité de données à analyser et à archiver est énorme et nécessite la mise en place de moyens spécifiques mutualisés tels que les grandes grilles de calculs. Cet effort ne doit pas se faire au détriment d'une identification naturaliste des espèces dans leur biotope, souvent liée à des critères morphologiques et éthologiques plus qu'à des critères génétiques. Ce sont des méthodes complémentaires, pas toujours réalisées par les mêmes acteurs. Les structures qui détiennent la connaissance naturaliste des écosystèmes, en France, le Muséum National d'Histoire

Naturelle, et des structures similaires à l'étranger, développent des systèmes experts d'aide à l'identification des espèces (e.g. Xper), qui sont des bases de connaissances multicritères. Elles peuvent servir d'interfaces pour que les scientifiques en charge de l'inventaire et de la caractérisation des espèces puissent se rencontrer, croiser leurs informations, et les divulguer dans une communauté plus large. C'est vers ce type d'outils que pourraient évoluer facilement les bases de données actuelles, pratiques mais peu propices à des démarches heuristiques.

L'observation de la biosphère, de ses états et de son fonctionnement, notamment celle de la dynamique des habitats, et des variables impliquées dans la relation entre les organismes, les populations, les communautés et leurs biotopes, nécessite des moyens appropriés qui s'appuient sur les moyens de mesures globales de l'environnement terrestre, mais qui réclament des développements spécifiques. Deux grandes tendances se dessinent, elles demandent de développer des capteurs spécifiques : les observations par télédétection (pour lesquelles les satellites offrent la vision la plus synoptique possible) et les observations par capteurs posés sur les organismes. Elles offrent des moyens très largement supérieurs à l'observation classique qui demande une intrusion systématique du chercheur dans l'écosystème. Dans le cas de la télédétection, l'écologie recherche une résolution spectrale accrue et une recherche avancée sur les combinaisons spectrales, permettant de caractériser les habitats, les organismes et leur activité. Dans le cas des capteurs portés par des organismes, la recherche s'oriente vers de plus en plus de miniaturisation, permettant de construire des « sondes » multiparamètres à grande capacité de stockage n'entravant pas les performances des organismes. La technologie permet maintenant de suivre longtemps, dans une grande gamme de conditions, un grand nombre d'organisme (e.g. grâce notamment à la RFID – Radio Frequency Identification).

L'approche expérimentale

Deux approches complémentaires permettent d'étudier les processus écologiques qui gouvernent les écosystèmes :

- ▶ La manipulation *in situ* des populations, des communautés et des écosystèmes, qui consiste à introduire, dans les écosystèmes naturels, des sources de perturbations (déplacements, ajouts, retraits de population, fragmentation des habitats, ...) pour observer la réponse de l'ensemble des composantes étudiées.
- ▶ L'expérimentation dans des systèmes simplifiés, reconstruits qui permettent de se focaliser sur une quantité réduite de composantes, pour étudier, en général, un plus petit nombre de facteurs biotiques et abiotiques. Le niveau de contrôle est souvent meilleur que dans le premier cas, et les plans d'expériences sont plus faciles à définir.

Les Stations d'Ecologie Expérimentales

Socle de la recherche expérimentale en écologie. Les stations d'écologie expérimentale, qui s'organisent en Réseau (RéSEE), sont des infrastructures qui permettent de mener, grâce à des équipements ad hoc, des expérimentations écologiques en conditions contrôlées ou semi-contrôlées. Ces expériences peuvent être réalisées *ex situ*, quand il s'agit de reconstruire, dans des structures spéciales, un système d'étude particulier, mais elles peuvent être réalisées *in situ* quand il s'agit de manipuler, dans des conditions très encadrées, des écosystèmes naturels. Parce qu'elles sont situées dans des environnements contrastés, les stations d'écologie expérimentales se spécialisent, en général, dans l'étude d'un type de biotopes particulier et fournissent un accès et une logistique scientifique adéquate. Profitant d'un contexte géographique national varié, les SEE permettent l'accès à une grande variété de biotopes, parmi lesquels sont :

- ▶ Les biotopes lagunaires et marins côtiers
- ▶ Les biotopes aquatiques continentaux
- ▶ Les biotopes cavernicoles
- ▶ Les biotopes de montagne
- ▶ Les biotopes de plaine
- ▶ Les biotopes de forêt tropicale

Les Stations d'Ecologie Expérimentales permettent principalement de développer, grâce à l'environnement dont elles disposent, des programmes de recherche qui intègrent des travaux théoriques, une démarche descriptive et comparative, et les travaux expérimentaux qui autorisent le test d'hypothèses. Elles ont donc vocation à fédérer des équipes de recherche autour de programmes d'écologie expérimentale. Elles sont complémentaires, à la fois au niveau des biotopes dont elles assurent l'accès, et au niveau des structures expérimentales qu'elles développent pour les besoins de leurs recherches.

Les ECOTRONS

Un nouveau challenge technologique et scientifique. Les ECOTRONS sont des simulateurs expérimentaux d'écosystèmes permettant, dans des conditions de contrôle optimal, de mesurer les variables biologiques, physiques et chimiques qui les définissent. La démarche scientifique qui s'y rapporte consiste à tester des hypothèses de fonctionnement – formalisées par des modèles – pour en déduire des propriétés fondamentales de systèmes réels (complexes et adaptatifs), et *in fine*, pour en prédire l'évolution. Les ECOTRONS sont des instruments nouveaux qui permettent de remplir un vide scientifique entre des expériences trop simplifiées en laboratoire, et trop complexes dans la nature. En remplissant ce vide, l'écologie se dote des moyens qui lui permettront de prédire le devenir des écosystèmes, moyens dont elle ne peut se prévaloir de disposer jusqu'à présent. La feuille de route

nationale « Très Grandes Infrastructures de Recherche » rédigée par le Ministère de la Recherche et publiée fin 2008 identifie ces nouveaux instruments de la façon suivante : « Un ECOTRON permet d'étudier en conditions contrôlées les réponses des écosystèmes, des organismes et de la biodiversité aux modifications de l'environnement, comme le changement climatique ». En écho, le rapport général de la Stratégie Nationale d'Innovation et de Recherche, publiée en 2009, souligne que, pour réaliser le grand défi du maintien durable de l'Homme sur Terre, « la recherche joue un rôle essentiel pour inverser la tendance environnementale, préserver la biodiversité et les milieux, concevoir de nouvelles solutions énergétiques et réduire les émissions de gaz à effet de serre ». Si des solutions scientifiques et techniques peuvent d'ores et déjà être envisagées, elles ne pourront être testées véritablement et de manière sûre, que si les outils qui permettent de les expérimenter en amont, dans des systèmes écologiques complexes, en conditions complètement contrôlées, sont disponibles. A titre d'exemple, le projet SCALE (Sealing Carbon and Life in Ecotron), lancé par le NERC Centre for Population Biology, qui nécessite d'étudier des cycles élémentaires dans un milieu fermé en matière, mais ouvert en énergie (mimant ainsi le système Terre) a pour but de quantifier les grandes lois qui gouvernent le comportement dynamique du cycle du carbone. Les perspectives de ces recherches fondamentales ont des applications directes, celles de pouvoir prédire la réponse des compartiments de stockage du carbone aux variations de la température.

A ces enjeux environnementaux actuels s'ajoutent ceux qui visent à définir précisément la notion d'écosystèmes minimum, de faible diversité, mais viables, et qui sont à l'étude pour permettre le soutien à la vie, hors de la planète.

L'Agence spatiale européenne, à l'instar de ses homologues sur d'autres continents, a lancé un projet visant à déterminer un « système de soutien à la vie », pouvant être embarqué dans l'espace, et permettant la survie du personnel d'une mission spatiale (Projet MELISSA - Micro-Ecological Life Support System Alternative). Le système défini, qui a fait l'objet d'un grand effort de modélisation mathématique, doit maintenant trouver la validation expérimentale qui lui permettra d'être opérationnel.

Les ECOTRONS sont particulièrement adaptés à ces nouvelles problématiques, permettant simultanément de conditionner l'environnement d'écosystèmes naturels (terrestres ou aquatiques), simplifiés ou artificiels, et de mesurer les processus générés par les organismes vivants présents dans ces écosystèmes, notamment les flux de matière et d'énergie. Ils servent l'étude de l'impact de facteurs environnementaux naturels ou anthropiques sur des communautés entières, qui peuvent

également subir des manipulations, séparément ou simultanément, afin d'apprécier le rôle que chaque composante a dans le fonctionnement global de l'écosystème.

La première génération d'ECOTRON, notamment celui de Londres, construit en 1992, reprenait le principe des phytotrons existants, mais adressait des questions d'écologie sur les écosystèmes plutôt que de physiologie sur les plantes. L'accent était mis sur le conditionnement microclimatique et ne prévoyait pas, ou peu, de mesures de processus biologiques intégrées à l'équipement.

La deuxième génération d'ECOTRON, celui qui est actuellement en cours de construction à Montpellier (ECOTRON de Montpellier à Baillarguet) possèdera, à terme, une très grande capacité de simulation de différents environnements, dans des séries d'enceintes de confinement. Elles se caractérisent surtout par l'intégration d'instruments de mesures originaux, avec une très grande résolution spatiale et temporelle, qui permettront une analyse approfondie du fonctionnement des écosystèmes et de leur évolution en fonction de divers scénarios de changements globaux.

La troisième génération d'ECOTRON, encore à l'étude, mais qui a conduit à la construction d'un prototype à l'ENS de Paris (ECOTRON d'Ile de France à Foljuif), notamment dans le cadre du projet européen de design study ANAEE, se caractérisera par la possibilité de simuler des environnements extrêmes, artificiels ou disparus, éventuellement exo-panéaires, et dans certains cas en systèmes complètement fermés. Le principal saut technologique à franchir reste la conception simultanée des enceintes de confinement et des instruments de mesures originaux qui donneront accès en temps réel à la dynamique des écosystèmes. Ceci requiert non seulement une collaboration internationale, mais aussi un travail interdisciplinaire entre écologues, biologistes, physiciens et chimistes. La France est pour l'instant la mieux placée pour mettre en œuvre, au sein de ses stratégies de recherche, cette collaboration et développer les futurs ECOTRONS, véritables équivalents des télescopes de l'astrophysique et synchrotrons de la physique des particules.

Communautés concernées

Dans les années 1990, la volonté internationale de relever le défi, de comprendre le lien entre les changements de la biodiversité et la dynamique de la biosphère, s'est traduite par la mise en place de grands programmes de recherche tels que Diversitas ou IGBP-GCTE (International Geosphere-Biosphere Programme, Global Change and Terrestrial Ecosystems). Les communautés scientifiques françaises se sont retrouvées dans ces programmes, dont les projets scientifiques ont souvent montré une bonne expertise sur les systèmes d'observation, mais un profond déficit en matière d'infrastructures dédiées à l'expérimentation sur les systèmes écologiques, malgré l'existence de Station Expérimentales.

Le projet d'ECOTRONS est né de la volonté de la direction du dépar-

tement des sciences de la vie (Robert Barbault, Paul Tréhen, François Renaud) à la fin des années 1990, suite aux premiers succès des recherches menées à l'Ecotron de Londres. Les ECOTRONS devaient permettre d'associer des physiologistes des écosystèmes d'une part, et les biologistes des communautés et des populations d'autre part, deux communautés de l'écologie qui n'avaient pas d'interactions. La nouvelle thématique qui émergea de cette collaboration est celle de la « biodiversité fonctionnelle » qui se développe largement dans tous les domaines de l'observation, de l'expérimentation et de la modélisation en écologie.

Maintenant, encore plus largement, l'étude des systèmes complexes, naturels ou artificiels, reposera non seulement une collaboration internationale forte, mais aussi sur des collaborations étroites entre écologues, biologistes, physiciens et chimistes. Les applications sont nombreuses, dans les domaines de l'agronomie, de l'ingénierie écologique, et dans celui des sciences de la santé.

L'Ecotron de Londres est devenu obsolète (faible gamme de variations environnementale, très peu d'instruments de mesure des processus), celui de Reno (Ecocells) offre peu d'enceintes de confinement, et la communauté agronomique, qui possède déjà de nombreux phytotrons dont certains pourraient être utilisés pour l'étude d'écosystèmes, est limitée par la capacité de mesure des processus. Les besoins des communautés scientifiques sont aujourd'hui loin d'être satisfaits.

Positionnement national et international

Les grandes infrastructures de recherche en écologie (expérimentation, observation, archivage des données, calcul) doivent se positionner dans une structure particulière, à l'échelle nationale. Le comité TGE/TGI du CNRS, miroir scientifique opérationnel de la cellule TGIR du ministère, est la gouvernance idéale, puisqu'elle implique directement la Direction Scientifique de l'INEE, et qu'elle a déjà la charge de l'ensemble des Grands Equipements et des Grandes Infrastructures de Recherche nationales (Accélérateurs, Télescopes, Flotte océanographique, Grilles de calcul, Bases de données...). C'est un relais institutionnel national performant de projets internationaux de grande envergure.

Le développement des grandes infrastructures de la recherche en écologie repose sur des programmes européens ICOS, LifeWatch et ANAEE. ICOS et Lifewatch assurent les projets d'observation et de surveillance de la biosphère, mais ne prévoient pas l'analyse des systèmes, et donc n'envisagent pas de prédictions. Le projet ANAEE propose d'analyser l'environnement et d'étudier l'impact de l'usage des terres sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes, au travers de la complémentarité entre expérimentation et modélisation, réalisées dans un objectif prédictif. La composante « expérimentation » différencie ANAEE de LifeWatch. Le projet ANAEE devrait permettre d'inclure, à terme, l'étude des écosystèmes aquatiques, mais des initiatives propres d'infrastructures se sont développées (e.g. Network of leading MESO-

cosm facilities to advance the studies of future AQUATIC ecosystems from the Arctic to the Mediterranean, MESOAQUA).

Le projet ANAEE a pour objet de réunir des plateformes expérimentales s'appuyant sur les ORE et des LTER. Il repose principalement sur 3 composantes (i) études in situ, qui nécessitent la mobilisation des chercheurs travaillant dans le cadre des LTER, (ii) études in vitro qui visent à quantifier expérimentalement, en conditions très contrôlées, les processus analysés dans des conditions environnementales particulières, et (iii) études in silico qui reposent sur la modélisation mathématiques des systèmes écologiques. Les composantes (i) et (ii) s'associent maintenant pour proposer une structure européenne de type I3. La troisième composante, par contre, manque toujours de consistance, et il reste difficile de définir une infrastructure de recherche européenne en modélisation mathématique. La dimension « éco informatique » ou « biologie des systèmes » nécessite de définir un nombre fini d'un ou plusieurs écosystèmes « modèle ». La France, le Royaume-Uni et l'Allemagne constituent les trois pays les plus actifs dans le projet, aux côtés de l'Italie et de l'Espagne.

Les ECOTRONS sont identifiés dans le projet ANAEE comme les infrastructures européennes de référence pour la réalisation des expérimentations en conditions contrôlées (« In vitro Platforms include the Ecotron and similar facilities that are able to contain whole blocks of ecosystems within a precisely controlled environment, allowing the study of combinations of species and environmental conditions not possible in natura. Highly instrumented, they will give new insight into ecosystem processes »). Par ailleurs, les ECOTRONS français sont des structures qui servent de modèle pour la communauté scientifique internationale. Le projet de développement du VAL (Variable Atmospheric Laboratory), à l'Université d'Arizona à Phoenix, qui bénéficie d'un investissement de 80 à 100 Millions d'Euros, est un projet similaire avec un objectif convergent. Jon Harrison, porteur du VAL écrit, dans un article soumis à la revue Global Change Biology, « NSF and NIH recently proposed establishment of a centralized and versatile facility to meet the urgent need for experimental data to guide policy maker charged with mitigated the effects of global atmospheric and climatic change ». Dans cet article (Harrison et al. New facilities needed for replicated experimental investigations of earth system processes, submitted to Global Change Biology), une référence explicite est faite au projet français d'ECOTRON qui possède aujourd'hui une avance significative. Les auteurs concluent par un appel à collaboration transatlantique de la façon suivante: « The parallel development of VAL and the french/european ECOTRON would enable transcontinental collaborative projects focused on the formidable environmental challenges of global climate change ». Cette voie de collaboration apparaît comme essentielle pour mener à bien ce projet spécifique.

Partenariats avec les autres instituts ou autres établissements de recherche

Les problèmes de l'environnement terrestre concernent un grand nombre (si ce n'est tous) d'instituts du CNRS. Ils concernent aussi d'autres établissements publics ou privés tels que l'IFREMER, l'INRA, le CIRAD, l'IRD, les Universités... des fondations de recherche sur la biodiversité et sur l'environnement, les collectivités locales et les industries qui doivent maintenant incorporer les paramètres du développement durable dans leur activité.

D'une manière plus spécifique, le développement de capteurs se fait déjà en partenariat étroit avec l'IN2P3, l'INSU, l'Institut de Chimie, l'IFREMER. Les grandes structures expérimentales se font aussi en concertation avec l'ENS, l'INRA, l'Université de Montpellier. Les grandes bases de données doivent être réfléchies globalement, au sein du CNRS et à l'échelle nationale et internationale, le calcul suit le même chemin, au travers des grilles nationales et européennes.

Ceci montre à quel point les grands projets d'infrastructure pour l'observation, l'expérimentation et la modélisation en écologie, promus et soutenus par l'INEE, doivent trouver une assise plus large à l'échelle de l'Europe de la Recherche.

Outils, priorités et pistes d'actions

Les TGIR en écologie peuvent recouvrir plusieurs aspects, mais seules les structures expérimentales (ECOTRONS et Stations d'Ecologie Expérimentales) ont déjà fait l'objet d'une démarche spécifique auprès du comité TGE/TGI du CNRS. La constitution et la mise en réseau de grandes bases de données, des plateformes de génomiques, des moyens de calculs spécifiquement dédiés pourraient suivre rapidement. L'implication de l'INEE dans les structures existantes (Flotte Océanographique, Instruments d'analyse spécifiques, Télédétection) doit se poursuivre et se renforcer.

Les projets nationaux qui supportent des très grandes structures de recherche doivent suivre un cycle bien déterminé, et une véritable culture de projet doit être développée dans cette perspective. Si le projet individuel supporte un pilotage « à vue », cela n'est pas le cas de projets nationaux qui requièrent des pilotages institutionnels. Chaque projet identifié doit respecter des étapes qui sont évaluées. Dès sa conception et jusqu'à sa réalisation, le projet scientifique évolue par phases. Il apparaît rapidement nécessaire que l'aboutissement de chaque phase fasse l'objet d'une évaluation permettant d'entrer dans la phase suivante avec un maximum d'assurance (donc un minimum

de risque), et une validation institutionnelle (qui assure la maîtrise de l'ouvrage). Généralement, sept phases sont identifiées :

Phase 0 : phase exploratoire, qui conduit à faire un ensemble de propositions

Phase 1 : étude de faisabilité

Phase 2 : définition préliminaire (correspondant à une phase de recherche)

Phase 3 : définition détaillée (correspondant à une phase de développement)

Phase 4 : réalisation et qualification du projet

Phase A : utilisation (ou exploitation)

Phase B : retrait de service, démantèlement ou arrêt.

Trois évaluations sont prépondérantes, celle qui permet de choisir les solutions techniques les plus adaptées aux ambitions scientifiques, celle qui valide la définition d'un « cahier des charges », et celle qui autorise la construction (souvent coûteuse) de l'instrument (une fois que l'ensemble du projet est bien dimensionné).

L'objectif des évaluations est de permettre de maîtriser et de contrôler le déroulement du projet (coût, risques, délais), de s'assurer que rien n'est oublié en cours de réalisation du système, de vérifier que la définition des systèmes est correctement effectuée, et que les fonctions attendues des structures correspondent bien aux besoins qui ont été exprimés.

Chaque phase doit être documentée, pour pouvoir être examinée. Les principaux documents sont : le cahier des charges fonctionnel, qui décrit la demande en termes de besoins et de services attendus. Il n'exprime pas de solutions, et laisse toute latitude au concepteur (équipe projet) pour trouver les meilleures. La spécification technique de besoin, établie à l'intention du concepteur, fixe de manière contractuelle, les exigences techniques et les conditions de la vérification du respect de ces exigences. Le dossier de définition est la réponse du concepteur à la STB. Le plan de développement décrit les étapes techniques du projet (travaux à réaliser au cours des différentes phases), la politique industrielle adoptée, l'ensemble des technologies et qualifications nécessaires à mettre en oeuvre. Le plan de management décrit les rôles respectifs de chaque entité et acteurs du projet. Les plans de gestion de la documentation, de la configuration du projet, de l'assurance qualité, de la sécurité de fonctionnement ; le dossier industriel qui doit être établi par l'ensemble des sous-traitants pour la réalisation du projet.

Cette présentation succincte n'a que le mérite de montrer l'absence de culture dans le domaine de la conduite de projet, de la communauté scientifique des écologistes. L'Institut Ecologie et Environnement a bénéficié, pour le projet des ECOTRONS, de l'appui de la cellule Qualité Assurance et Revue de Projet de l'IN2P3, et ceci a permis d'évaluer réellement le décalage entre la réalisation du projet et les ambitions scientifiques initiales. Il autorise maintenant de recalculer les composan-

tes du projet. L'INEE pourrait mettre en place sa propre méthodologie d'évaluation et sa propre cellule d'évaluation de projet, pour promouvoir plus efficacement l'ensemble des projets d'envergure nationale auprès du CNRS, des autres instituts, et auprès du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. ■

Actualités de la recherche

Les systèmes socio-écologiques : vers une approche spatiale et temporelle

Yvan Lagadeuc¹, Robert Chenorkian²

¹ Délégué scientifique, Institut Écologie et Environnement, CNRS, Campus Gérard Mégie, 3 rue Michel-Ange, 75794 Paris cedex 16, France

² Directeur scientifique adjoint, Institut Écologie et Environnement, CNRS, Campus Gérard Mégie, 3 rue Michel-Ange, 75794 Paris cedex 16, France

Au cœur de l'approche RASE (*regional analysis of social-ecological systems*) proposée par Bourgeron *et al.*¹ se pose en fait la prise en considération des spécificités des systèmes socio-écologiques (*social-ecological systems*, SES). Les SES correspondent à des systèmes intégrés couplant les sociétés et la nature (Liu *et al.*, 2007), ce qui vise finalement à redéfinir les écosystèmes en considérant explicitement l'ensemble des acteurs, en intégrant donc l'homme comme une composante active du système. Le plus souvent, les études dédiées aux interactions hommes-milieux ou aux écosystèmes positionnent cet acteur majeur en dehors du système naturel, ce qui, de fait, limite notre capacité à prendre en considération la complexité des interactions existantes entre l'homme et la nature (Redman *et al.*, 2004 ; Liu *et al.*, 2007 ; Folke, 2007). La séparation des communautés scientifiques, qui traditionnellement ont développé les connaissances, soit sur l'homme, soit sur la nature, est encore à ce jour une barrière forte à la progression d'une connaissance étayée par des fondements théoriques renouvelés et des approches empiriques adéquates. L'étude des SES ne nécessite pas la création d'une discipline nouvelle, mais une interaction mature des disciplines originelles afin qu'elles partagent des hypothèses communes. Par exemple, l'hétérogénéité des dynamiques nécessite une approche spatialisée à l'échelle d'un territoire, comme l'indiquent Bourgeron *et al.*, ou faisant appel à la comparaison entre territoires (Liu *et al.*, 2007 ; Ostrom *et al.*, 2007). Toutefois, la définition du territoire dans lequel s'effectuera l'étude est sous une double contrainte : celle des sociétés humaines et celle des biotopes, dont les emprises spatiales ne sont pas obligatoirement les mêmes.

Auteur correspondant : Y. Lagadeuc, yvan.lagadeuc@cnrs-dir.fr

¹ Voir dans ce numéro (rubrique « Actualités de la recherche »), le texte de P.S. Bourgeron, H.C. Humphries et L. Riboli-Sasco, "Regional analysis of social-ecological systems".

Une des autres spécificités fortes des SES correspond aux dynamiques temporelles. Celles-ci sont étroitement couplées, comme l'explique, par exemple, le schéma conceptuel (Figure ; US LTER, 2007) proposé récemment par le réseau américain Long Term Ecological Research (LTER). Ce schéma représente, dans sa partie droite, le domaine de la recherche traditionnelle en écologie et, dans sa partie gauche, la dimension humaine des changements environnementaux ; ces deux parties sont liées par les services fournis par les écosystèmes et par les perturbations influencées ou induites par l'homme. Les liens entre les différents compartiments sont exprimés par les questions Q1 à Q6.

La complexité d'un tel système implique, par exemple, des processus de rétroactions associés à des réponses non linéaires (Walker *et al.*, 2004 ; Liu *et al.*, 2007). Toutefois, la dynamique temporelle globale de ces systèmes apparaît être de deux types, qui se succèdent ou alternent à une échelle macroscopique, comme le montrent Bourgeron *et al.* : période d'état stable et période de changements radicaux. Ces hétérogénéités temporelles sont parfois le fait de la diversité des règles de gouvernance des SES, mais elles peuvent en être totalement indépendantes. Ainsi, comme le soulignent Ostrom *et al.* (2007), les scénarios prospectifs et les choix de gouvernance ne peuvent être uniques et nécessitent donc des analyses et des constructions spécifiques.

Quel dispositif pour étudier les SES ?

Si nous faisons abstraction de la contrainte liée à la création d'une communauté scientifique, qui est en cours d'identification, par exemple, au sein de l'institut Écologie et environnement (INEE) du CNRS, Bourgeron *et al.*

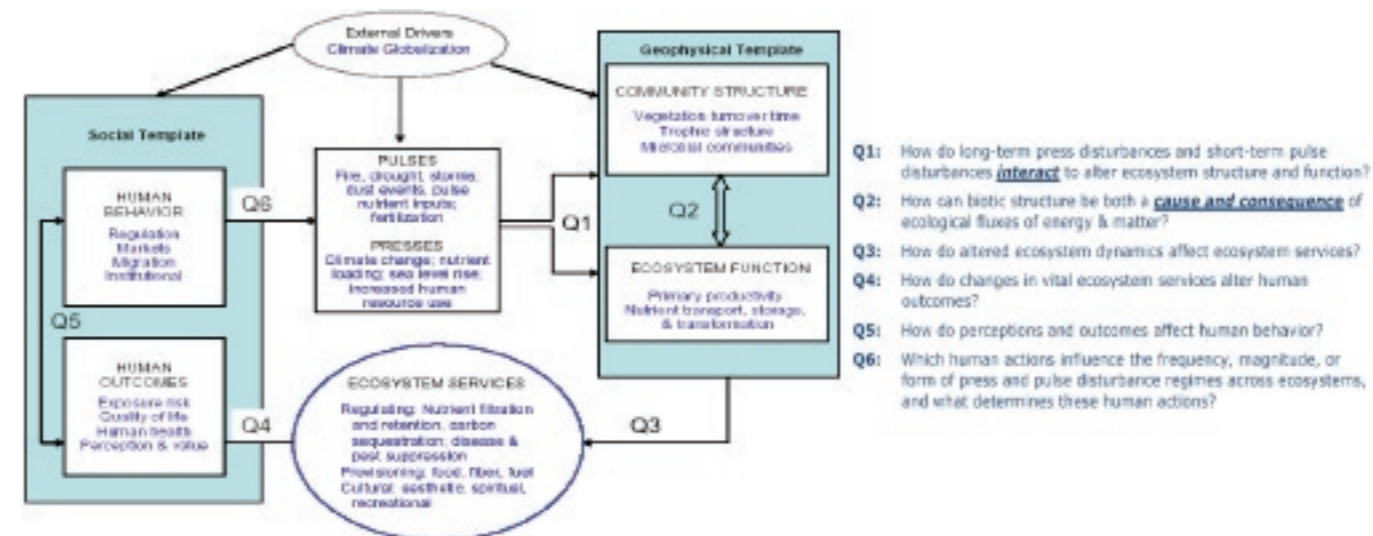


Figure. Schéma conceptuel des SES (source : US LTER, 2007).

rappellent, dans leur article, que l'approche régionale est indispensable et qu'elle doit s'inscrire dans le long terme. Les différentes étapes de la mise en œuvre de l'approche spatiale sont au cœur de ce texte. Elles correspondent à l'identification du SES et à sa délimitation, à sa caractérisation et enfin au développement de scénarios prospectifs.

D'un point de vue temporel, l'existence de différentes échelles de temps nécessite, à nos yeux, la mise en œuvre de dispositifs d'études spécifiques dédiés à des dynamiques lentes ou rapides, selon les caractéristiques du système tel qu'évoqué ci-dessus. Une telle approche correspond parfaitement à celle menée au sein des zones ateliers (ZA) ou des observatoires hommes-milieux (OHM) de l'INEE, qui sont respectivement adaptés aux dynamiques lentes et aux dynamiques rapides.

Il y a une vingtaine d'années, le CNRS, à travers ses PIREN (Programmes interdisciplinaires de recherche en environnement), a créé les zones ateliers, conçues comme un vaste réseau interorganismes de recherches interdisciplinaires coordonnées et organisées territorialement, en prise directe avec les questionnements émanant du monde gestionnaire, associatif et politique au niveau régional. Les actions des zones ateliers ont été coordonnées ces dernières années par le département Environnement et développement durable (EDD) du CNRS et sont aujourd'hui confiées à l'INEE, qui lui succède (<http://www.cnrs.fr/edd/recherche/infrastructures-za.htm>).

Le concept de zone atelier s'inscrit, comme pour les RASE, dans une zone géographique souvent régionale. Ces zones, actuellement au nombre de 9, sont définies en fonction de questionnements scientifiques provenant, soit d'une dynamique scientifique, soit d'une demande sociale reformulée en termes scientifiques et impliquant une recherche pluridisciplinaire, généralement pluriorganismes

sur le long terme. Le lien avec les questionnaires est, de ce fait, très fort et présent depuis l'initiation des différents projets.

Les zones ateliers partagent, avec le réseau LTER américain, un cadre conceptuel commun mettant en avant les processus intégrateurs et itératifs des interactions socio-écologiques (Figure). L'ensemble offre une diversité de situations contrastées, tant en ce qui concerne les milieux que les sociétés. Les thèmes de l'évolution de l'usage des terres (urbaines et rurales), du fonctionnement et des usages des hydrosystèmes, du poids des héritages anciens, de la gouvernance... sont au cœur des zones ateliers. Le fonctionnement écologique et biogéochimique des continus fluviaux, comme miroir de l'activité humaine dans leur bassin versant, est, par exemple, étudié dans des conditions très contrastées, et les travaux des archéologues et des historiens permettent d'évaluer les trajectoires sur le long terme (ZA Bassin du Rhône, ZA Loire, ZA Moselle, ZA ORME, ZA Seine). Les conséquences des actions de gestion des territoires sur la biodiversité et sur les services qu'elle rend bénéficient également au sein des zones ateliers d'un dispositif d'étude attractif (ZA Alpes, ZA Chizé, ZA Pleine Fougères, ZA Terres australes et antarctiques).

Cette diversité des situations étudiées implique un fonctionnement actif en réseau, ayant pour objectif de mutualiser les méthodologies (modélisation, systèmes d'information, interopérabilité des bases de données), de se saisir de questions scientifiques partagées et de mener des réflexions prospectives. Ce réseau permet également d'analyser de façon pertinente l'hétérogénéité des territoires, mais aussi de leurs réponses.

Les observatoires hommes-milieux (OHM) ont été créés voici deux ans par le département Environnement et développement durable (EDD) du CNRS et

Y. Lagadeuc et R. Chenorkian : *Natures Sciences Sociétés* 17, 194-196 (2009)

sont désormais suivis par l'INEE (<http://www.cnrs.fr/edd/recherche/infrastructures-ohm.htm>). Conçus comme des lieux d'interdisciplinarité, ils sont organisés autour d'un fait, anthropique ou non, mais à très forte capacité de structuration économique et sociale et à très fort impact environnemental, qu'un événement plus ou moins brutal, mais toujours majeur, vient profondément bouleverser, induisant ainsi des changements rapides du système. Ce fait peut être, par exemple, une exploitation minière ou une entreprise sidérurgique, dont on sait tout le poids économique, social et culturel qu'elles peuvent représenter pour des communautés humaines à l'échelle d'une ville, d'un département : elles sont l'employeur majeur dans l'espace et le temps – mineurs ou sidérurgistes de pères en fils – et l'école, le système de santé, le système bancaire, les caisses de retraite sont directement liés à l'entreprise. L'événement sera alors l'arrêt de l'exploitation, avec toutes les conséquences sociales et environnementales que l'on peut imaginer.

L'observatoire hommes-milieus invite toutes les disciplines, y compris les SHS au même titre que les autres, à étudier ce fait (conséquences de l'activité et de sa cessation dans le cas évoqué ci-dessus), depuis leur cœur de spécialité. Il est ensuite le lieu de rencontre de toutes ces disciplines, le lieu d'information réciproque et de mise en commun des travaux disciplinaires menés, par chacune d'elles, sur cet objet scientifique unique. De cette phase initiale de pluridisciplinarité, d'éclairage convergent du même sujet, pourront émerger des questions qui, dans chaque discipline prise isolément, n'apparaissaient pas ou semblaient hors d'atteinte ; pourront également être dégagées, des problématiques de marge, ou d'intersection à plusieurs domaines disciplinaires, et donc une interdisciplinarité, que la complexité des phénomènes rend nécessaire pour un traitement efficace. L'observatoire hommes-milieus, par le soutien à des programmes émergents validés par un conseil scientifique, assure la collecte, la conservation et l'interopérabilité des données issues de chacun des programmes, ainsi que la pérennité de leur disponibilité. Il est aussi un lieu de modélisation et d'expérimentation pour répondre explicitement aux questions sociales, économiques, de santé, voire politiques, nécessairement et violemment induites par ces situations, en termes de résilience, de remédiation et d'évaluation des performances des dispositifs proposés.

L'observatoire hommes-milieus, défini à l'échelle d'un territoire, est aujourd'hui en phase de mise en place avec deux observatoires créés à ce jour, mais il est destiné à se développer très fortement dès 2009. Le temps court et l'effet de crise sont là très fortement présents et sont même intrinsèquement des composants du système.

Ces deux dispositifs (ZA et OHM), bien qu'âgés de presque 20 ans pour l'un des deux, en sont encore en phase de développement. Les 5 aires de caractérisation décrites par Bourgeron *et al.* ont toutes été abordées : composante biologique, composante physique, interactions physique-biologie, composante sociale et, enfin, les SES dans leur ensemble incluant les couplages, les perturbations et la résilience. Notre effort dans les années à venir doit porter plus particulièrement sur cette dernière étape de la caractérisation des SES, car elle repose sur la création de cette nouvelle communauté de scientifiques construite à partir des disciplines traditionnelles et toujours en connexion avec celles-ci. C'est de cette création que naîtront les avancées conceptuelles majeures indispensables à l'intégration des données empiriques et aux progrès de notre connaissance des systèmes socio-écologiques.

Références

- Folke, C., 2007. Social-ecological systems and adaptive governance of the commons, *Ecological Research*, 22, 14-15.
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S.R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A.N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., Provencher, W., Redman, C.L., Schneider, S.H., Taylor, W.W., 2007. Complexity of coupled human and natural systems, *Science*, 317, 5844, 1513-1516.
- Ostrom, E., Janssen, M.A., Anderies, J.M., 2007. Going beyond panaceas, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 39, 15176-15178.
- Redman, C.L., Grove, J.M., Kuby, L.H., 2004. Integrating social science into the Long-Term Ecological Research (LTER) network: Social dimensions of ecological change and ecological dimensions of social change, *Ecosystems*, 7, 161-171.
- US Long Term Ecological Research Network (US LTER), 2007. *The Decadal Plan for LTER: Integrative Science for Society and the Environment*, Albuquerque (NM), LTER Network Office.
- Walker, B., Holling, C.S., Carpenter, S.R., Kinzig, A., 2004. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems, *Ecology and Society*, 9, 2, 5 (<http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5>).

ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AEP	Alimentation en Eau Potable
Afssa	Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments
Afsset	Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail
ANAEE	ANALysis and Experimentation on Ecosystems
AND	Acide Désoxyribo-Nucléique
ANR	Agence Nationale de la Recherche
BES-LTER	Baltimore Ecosystem Study Long-Term Ecological Research
CAP-LTER	Central Arizona-Phoenix Long-Term Ecological Research
CDD	Chimie pour le Développement Durable
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique
Cemagref	Institut de recherche finalisée de référence pour la gestion durable des eaux et des territoires
CES	Contaminants, Ecosystèmes et Santé
CHU	Centre Hospitalier Universitaire
CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CR	Chargé de Recherche
EA	Environnement et Agronomie
Econat	Environnement-Ecosystèmes Cultivés et Naturels
EFPA	Ecologie des Forêts, Prairies et Milieux Aquatiques
ENS	Ecole Nationale Supérieure
ENV	Ecole Nationale Vétérinaire
EPA	Etablissement Public à caractère Administratif
EPIC	Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial
EPISIM	EPIdemic SIMulation
EPST	Etablissement Public à caractère Scientifique et Technologique
ESF	European Science Foundation
FAO	Food and Agriculture Organization
FRB	Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité
GDR	Groupement de Recherche
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
HAP	Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
HMA-LTSE	Helsinki Metropolitan Area - Long-Term Socio Ecological Research
ICOS	Integrated Carbon Observation System
IFB	Institut Français de la Biodiversité
Ifremer	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
IGBP-GCTE	International Geosphere-Biosphere Programme- Global Change and Terrestrial Ecosystems
IGN	Institut Géographique National
IN2P3	Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules
INC	INstitut de Chimie
INEE	INstitut Ecologie et Environnement
Ineris	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
INRAP	Institut National de Recherches Archéologiques Préventives
INSB	INstitut des Sciences Biologiques
Inserm	Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale
INSHS	INstitut des Sciences Humaines et Sociales
INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
INTERREGS	Programme de coopération territoriale européenne transfrontalière, transnationale et interrégionale
Invs	Institut de Veille Sanitaire
IP	Institut Pasteur
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change

Annexe 2 - Liste des principaux acronymes

IR	Ingénieur de Recherche
IRBI	Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
ISCE	International Society of Chemical Ecology
JGI	Joint Genome Institute
LANL	Los Alamos National Laboratory
ILTER	Long Term Ecological Research
MEA	Millenium Ecosystem Assessment
MELISSA	Micro-Ecological Life Support System Alternative
MESOAQUA	Network of leading MESOCosm facilities to advance the studies of future AQUATIC ecosystems from the Arctic to the Mediterranean
MSFD	Marine Strategy Framework Directive
NERC	Natural Environment Research Council
NIH	National Institutes of Health
NSF	National Science Foundation
OHM	Observatoires Homme Milieu
OIE	Organisation Internationale pour la santé animale
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ONC	Office National de la Chasse
ONEMA	Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
ONF	Office National des Forêts
ORE	Observatoires de Recherche en Environnement
PCRD	Programme Cadre de Recherche et Développement
PEPS	Projets Exploratoires Pluridisciplinaires
PIRVE	Programme Interdisciplinaire de Recherche Ville et Environnement
PNSE	Plan National Santé Environnement
POP	Polluants Organiques Persistants
PREDIT	Programme de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres
R2DS	Réseau de Recherche sur le Développement Durable
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals,
RéSEE	Réseau des Stations d'Ecologie Expérimentales
RFID	Radio Frequency Identification
RTP	Réseau Thématique Pluridisciplinaire
SCALE	Sealing Carbon and Life in Ecotron
SESs	Socio-EcoSystèmes
SEST	Santé Environnement et Santé Travail
SIG	Système d'Information Géographique
SO	Services d'Observation de l'INSU
SPE	Santé des Plantes et Environnement
SRAS	Syndrome Respiratoire Aigu Sévère
STB	Spécification Technique de Besoin
SYSCOM	SYStèmes COMplexes et Modélisation
TGE	Très Grand Equipement
TGI	Très Grand Instrument
TGIR	Très Grandes Infrastructures de Recherche
TRANSIM	TRansportation ANalysis SIMulation System
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture
VAL	Variable Atmospheric Laboratory
WCS	Wildlife Conservation Society
ZA	Zone Atelier



Institut écologie et environnement (INEE) du CNRS
Campus Gérard Mégie – 3 rue Michel-Ange – 75794 Paris cedex 16
Site internet : <http://www.cnrs.fr/inee/>
Contacts : <http://www.cnrs.fr/inee/presentation/organigramme.htm>