

20

SURFACE CONTINENTALE ET INTERFACES

Président de la section
Gilles PINAY

Membres de la section

Philippe ACKERER

Thierry BARIAC

Pascale BAUDA

Cécile BERNARD

Yves BRUNET

Frédérique CARCAILLET

Éric CHAUVET

Gérard DEDIEU

Frédéric DELAY

Aline DIA

Christian FRANCE-LANORD

Janine GIBERT

Dominique JOLLY

Jean-Paul LAURENT

Nicole MAHR

Guillaume MORIN

Gilles MORVAN

Étienne MULLER

Joël NOILHAN

Pierre RIBSTEIN

La compréhension et la prédition des impacts des activités humaines sur les écosystèmes et les hydrosystèmes continentaux, lagunaires et côtiers, comptent parmi les défis importants à relever aujourd’hui et demain pour les scientifiques comme pour la société dans son ensemble. Dans le cadre du développement durable, il est nécessaire de développer fortement les recherches fondamentales sur les mécanismes de régulations physico-chimiques et biologiques des systèmes naturels et modifiés. Dans ce cadre, il faut prendre en compte les changements globaux naturels et anthropiques et la capacité de résilience des écosystèmes face à ces perturbations. Ces approches nécessitent un effort pluridisciplinaire qui a été impulsé grâce à la création de cette nouvelle section à l’interface SDU-SDV regroupant les forces scientifiques jusqu’alors dispersées. Les recherches entreprises dans cette section constituent un support important pour des aspects plus appliqués relevant des questions d’aléas, de risques, de traitement des déchets et d’ingénierie écologique.

Cette prospective a été réalisée à partir :

- des thématiques explorées par les laboratoires et l’expression de leurs besoins ;
- de l’analyse des réponses aux appels d’offre ECCO et EC2CO ;
- sur la base de la prospective SIC INSU qui s’est déroulée à Strasbourg en mars 2007 et a rassemblé plus de 300 participants.

La prospective porte sur:

- des thèmes de recherches tels que le rôle de la biodiversité ou des matières organiques dans le fonctionnement des écosystèmes, les conséquences des changements d'utilisation des terres;***
- les disciplines nécessaires pour aborder ces questions que sont l'écotoxicologie, la géochimie, la géophysique, l'hydrologie et la télédétection;***
- les types de milieux que sont les interfaces côtières et les milieux urbains qui permettent de favoriser les recherches pluridisciplinaires.***

1 – BIODIVERSITÉ

Dans le contexte d'une érosion de la biodiversité, du déséquilibre croissant des grands cycles biogéochimiques et du changement rapide de l'occupation des terres et des espaces côtiers, il est nécessaire de lever un certain nombre de verrous des connaissances pour comprendre leurs conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes et leur évolution. Ils portent notamment sur le rôle de la biodiversité au sens large (plasticité phénotypique des réponses des organismes, relations interspécifiques, réseaux trophiques, groupes fonctionnels) dans la régulation et les transferts d'énergie et de matières ainsi que dans les mécanismes de résistance et de résilience des écosystèmes face aux perturbations, lentes ou rapides.

La biodiversité se décline en différentes composantes en fonction de l'échelle de perception utilisée. Elle peut être considérée comme la diversité fondamentale des taxons ou des communautés étudiés (diversité taxonomique ou génétique), ou comme la composition des communautés en termes de stratégies adaptatives (diversité de traits, et plasticité de ces traits, ou diversité fonctionnelle). La biodiversité peut également être

déclinée en termes de diversité des biotransformations au sein d'une communauté (diversité des communautés fonctionnelles) ; de diversité taxonomique et/ou génétique au sein d'une communauté fonctionnelle, et de diversité des stratégies pour réaliser une fonction donnée. Elle peut également se concevoir au travers de la complexité des relations trophiques aux seins des biocénoses.

Dans ce cadre plusieurs questions restent à élucider :

- en quoi la biodiversité agit-elle sur la relation habitat-fonctionnement ? Par exemple, une modification de l'habitat a-t-elle des effets d'autant plus irréversibles sur le fonctionnement de l'écosystème qu'elle entraîne une modification, en termes de composition ou de diversité, des acteurs des biotransformations ? La notion de communauté fonctionnelle est à l'évidence centrale dans cette problématique. Il est important d'envisager que cette notion s'affranchisse davantage des contraintes taxonomiques (des organismes inter-règnes pouvant participer à la réalisation d'une même fonction au sein de l'écosystème) ;

- peut-on associer aux typologies reposant sur la relation habitat-biodiversité des fonctions spécifiques ? Autrement dit, peut-on identifier, à partir de typologies reliant variables environnementales et structure des communautés, des fonctions caractéristiques de chaque type d'écosystème identifié ;

- quels sont les seuils d'altération des écosystèmes au-delà desquels le changement global aura des conséquences irréversibles sur la biodiversité et les fonctions associées ? En d'autres termes combien de fonctions peuvent-elles disparaître ou être atténuées sans que les services rendus par l'écosystème ne soient trop gravement compromis ?

- quel est le poids de la gestion passée des écosystèmes sur leur fonctionnement présent et futur ? Il est, en effet, largement reconnu que ces usages passés ont généralement laissé une empreinte forte sur les fonctionnements actuels. Une question encore peu étudiée, mais très actuelle, concerne la manière dont la gestion passée de ces écosystèmes

conditionnera leurs modalités de réponse aux activités humaines.

La pertinence des réponses apportées à ces différentes questions sera renforcée si les acteurs des projets combinent des approches comparatives (description des processus à l'échelle des écosystèmes) et des approches expérimentales, à l'échelle des écosystèmes ou en milieux contrôlés (mésocosmes). Des expérimentations en vraie grandeur telles que les opérations de restauration ou de renaturation, relevant de l'ingénierie écologique, constituent des outils uniques. Ils offrent la possibilité d'agir à l'échelle d'un écosystème ou d'un paysage entier sur les variables de contrôle de la biodiversité et les fonctions associées.

La dimension évolutive (via les mutations, ou les radiations adaptatives) est potentiellement importante dans ces questionnements. Cette dimension est difficile à prendre en compte expérimentalement pour les organismes supérieurs en raison de leur temps de génération. À cet égard, les micro-organismes, en permettant un rapprochement des temps évolutif et fonctionnel constituent un excellent modèle expérimental. Par ailleurs, la génomique offre de nouvelles clés pour la compréhension du vivant, et notamment des interactions entre le monde vivant et son environnement. De ce fait, la génomique environnementale prendra une place de plus en plus importante dans le domaine de l'Écologie, à l'interface de plusieurs disciplines qui ont comme dénominateur commun, l'étude de la biodiversité, et plus précisément de l'impact structure/fonction de cette biodiversité dans des écosystèmes naturels ou soumis à des perturbations liées à l'activité anthropique. L'ère de la génomique ouvre la voie à de nouvelles questions de recherche qui étaient jusqu'à ce jour inaccessibles. Du fait de l'émergence de nouveaux outils de séquençage (séquenceur de masse ou pyroséquenceur), la génomique offre désormais une vision intégrative des mécanismes induits par une modification environnementale.

2 – MATIÈRES ORGANIQUES

Les matières organiques présentes dans les milieux continentaux sont en prise avec de nombreuses questions posées par les relations biodiversité – fonctions des écosystèmes mais aussi avec des questions sociétales (stockage de carbone, gestion des déchets, des sites dégradés, etc.). La question scientifique centrale est toujours de relier nature chimique – toxicité – dynamique – localisation et fonctions des MO. La compréhension des processus de stabilisation / déstabilisation des MO est une question majeure qui est aujourd'hui un verrou pour prévoir et modéliser la cinétique des biotransformations des MO, leur diversité de composition (MO aquatique, MO de sol, MO anthropique), leur variabilité spatiale (type de sol, caractéristiques du milieu sédimentaire, etc.), les dynamiques à très long terme (importantes pour le stockage de C), l'effet de perturbations des milieux (actions humaines, changements climatiques). La compréhension des différents processus dans les différents milieux est nécessaire à l'étude des flux de matières organiques entre ces milieux.

Le choix de l'échelle d'étude des MO est une question qui se pose dans des termes nouveaux depuis le développement récent de travaux à l'échelle moléculaire. Ces travaux ont contribué à ouvrir la « boîte noire » des matières organiques. Toutefois, si l'étude de la MO à l'échelle moléculaire fournit des informations pertinentes sur la récalcitrance chimique des MO, l'intégration des résultats issus de ces caractérisations fines avec le système naturel complexe et dynamique reste encore difficile à réaliser. La modélisation doit permettre d'intégrer les différentes échelles, avec pour objectif final la connaissance des stocks, flux et dynamiques des MO, de leurs transformations à différentes échelles de temps et de leurs interactions avec d'autres éléments et substances.

Il est apparu important de promouvoir quelques thèmes à la croisée des différentes disciplines :

– évolution des caractéristiques chimiques (fonctionnalité, aromaticité, distribution molé-

culaire), physico-chimiques (surface spécifique, charge, énergie de surface, hydrophobité) et physiques (taille, porosité, élasticité, etc.) des MO au cours de leurs biotransformations ; ces caractéristiques étant pertinentes vis-à-vis de leur réactivité et plus généralement de leurs fonctions ;

– processus de stabilisation des MO (résistance et/ou biotransformations chimiques, protection physico-chimique, protection physique, etc.) : hiérarchie, pas de temps concernés, interactions entre processus, importance relative selon les sols et le climat ;

– contrôle des biotransformations des MO dans l'architecture des sols ; relation entre la nature des MO, leur localisation et la structure des populations microbiennes hétérotrophes ;

– modélisation de la dynamique des MO à l'échelle moléculaire dans les sols, les eaux et les sédiments ;

– prise en compte de l'écologie microbienne dans les modèles de dynamique des MO. Modèles à représentation spatiale explicite, modèles individus centrés.

3 – ÉCOTOXICOLOGIE

La question scientifique majeure à propos des polluants concerne l'effet des multi-pollutions, pollutions diffuses et chroniques sur le fonctionnement des écosystèmes et sur l'homme. Il s'agit de déterminer plus précisément le lien entre les activités anthropiques, la dégradation des milieux naturels et l'impact sur la santé humaine. La priorité doit être donnée au développement des méthodes moléculaires pour accéder à la diversité fonctionnelle et à l'expression de gènes fonctionnels *in situ* et à leurs utilités dans le cas de pollutions diffuses. L'étude des modes de transferts et de dégradation et les mécanismes bio-physicochimiques associés doit aussi être encouragé en insistant notamment sur les interactions avec les MO microbiennes et la dynamique des interfaces

solutions – minéraux – MO – organismes à l'échelle moléculaire. Dans ce cadre 3 questions plus spécifiques à la communauté SIC peuvent être identifiées :

– quels sont les liens entre l'anthropisation et la prolifération des organismes générant des toxines (phytoplancton et bactérioplancton toxiques, champignons, etc.) ?

– quels sont les impacts sur les écosystèmes et l'homme des transferts et dépôts aériens de polluants et l'entrée dans la chaîne alimentaire via le continuum sol-eau-plante-animal ?

– quels sont les impacts des polluants émergents issus principalement des médicaments et les particules de petite taille (atmosphériques et issues des nanotechnologies) sur la diversité fonctionnelle ?

4 – GÉOCHIMIE

La géochimie permet d'approfondir la connaissance des liens existants entre les processus écosystémiques et biogéochimiques, la diversité du vivant et les paramètres environnementaux, et ce, depuis les surfaces continentales jusqu'aux interfaces continent-océan est fondamentale. Cette démarche scientifique passe nécessairement par l'acquisition de données représentatives réellement fiables pour l'élaboration de modèles robustes afin de mieux documenter l'évolution fine des milieux continentaux naturels ou anthropisés. En raison de la complexité du milieu naturel, il semble indispensable de développer ou de renforcer les approches de type « milieu contrôlé » à une échelle supérieure à celle des microcosmes et d'y associer de nouveaux capteurs. Cette démarche devrait permettre à la fois d'établir une hiérarchisation très stricte des paramètres impliqués dans le contrôle des fonctions essentielles de ces milieux à différentes échelles, d'évaluer l'importance relative des différents processus et de borner leur variabilité spatio-temporelle et enfin de mesurer les flux élémentaires aux interfaces.

Les différents verrous méthodologiques identifiés par cet atelier concernent plus particulièrement :

- l'identification des processus et des mécanismes fondamentaux : représentativité de l'échantillonnage et de la mesure à différentes échelles d'observation et de niveaux d'organisation, portabilité des variables et des coefficients de transferts, détection de processus émergents à différentes échelles ;

- la métrologie liée aux capteurs (non destructif ou invasif, miniaturisation, analyse du signal, redondance et distribution, robustesse/sensibilité/rapidité) ;

- le couplage avec des méthodes d'analyse déportée (biologie moléculaire, imagerie multidimensionnelle ou hyperspectrale) ;

- la gestion des bases de données (accès et sauvegarde).

Darcy en combinant ces mesures à des mesures de tensions d'électrofiltration. Il convient maintenant de rentrer dans une étape de maturation, on pourrait dire « de rédaction » dans ce nouvel espace des possibles. Une autre évolution concerne la description nécessaire de la zone non saturée, intermédiaire obligé quant aux transferts entre la surface et la zone saturée. Cette zone souvent mal définie, quelquefois très hétérogène, est également la zone limite de nombreuses lois de comportement.

6 – HYDROLOGIE

Le cycle hydrologique est le vecteur principal des flux d'eau, d'énergie et de matières (dissoutes, en suspension, naturelles ou d'origine anthropique) dans les différents compartiments constituant les Surfaces Continentales (sous-sol, sol, végétation, atmosphère, réseaux hydrographiques, océan côtier). Caractérisé par de fortes non-linéarités, le fonctionnement des hydrosystèmes continentaux résulte de la combinaison de différents processus contrôlés en tout point et à tout instant par les caractéristiques du milieu, les conditions initiales et aux limites et les forçages/perturbations internes et externes.

Les recherches hydrologiques sur ces objets complexes (par exemple les hydrosystèmes) doivent constamment arbitrer entre les approches disciplinaires et systémiques, en liaison avec de nombreuses autres sciences.

Des efforts de soutien à des recherches de très grande qualité centrées sur l'hydrologie sous conditions naturelles et/ou sous influences des activités anthropiques, doivent être poursuivis.

Parmi les chantiers prioritaires à ouvrir ou à poursuivre, citons :

- le développement de méthodes et théories centrées sur les spécificités de l'hydrologie : méthodes numériques, méthodes inverses telle l'assimilation de données, combinaison de modèles et données, propagation d'incertitudes ;

5 – GÉOPHYSIQUE

La relation entre l'utilisateur et les outils géophysiques (en particulier l'utilisateur non géophysicien : l'hydrologue, le pédologue, l'agriculteur) s'est accrue ces dernières années. Cette évolution relève de l'utilité à banaliser l'outil géophysique, à le rendre opérationnel pour le suivi de certains paramètres environnementaux (appliqué à la gestion ou à la recherche). Le passage des paramètres géophysiques (résistivité, vitesse sismique, permittivité électrique, viscosité magnétique, coefficients de couplages en électrofiltration etc.) vers les paramètres plus utilisables de description du sol (porosité, perméabilité, taux d'argile etc.) n'a jamais autant mobilisé les communautés géophysiques. Un prototype historique de telles passerelles est la loi de Darcy. Aujourd'hui, divers auteurs s'accordent à estimer que l'on dispose des moyens cognitifs et instrumentaux pour obtenir la conductivité hydraulique et la perméabilité d'un milieu, grâce à la résistivité complexe, et à remonter même aux vitesse de

– les inter-comparaisons de modèles et méthodes sur la base de données issues des ORE ;

– les couplages entre l'hydrologie et les autres disciplines investies dans les SIC, à savoir l'atmosphère, la biologie, l'écologie, la géochimie et la géophysique ;

– les risques hydro-météorologiques ;

– le transport solide et la dynamique fluviale dans le continuum bassin versant réseau hydrographique ;

– les interfaces entre les différents compartiments des écosystèmes : interactions avec les systèmes côtiers, terrestres et aquatiques.

planétaire de l'utilisation des terres doit être appréhendé en regard. C'est en enjeu international et européen ;

– quelles sont les trajectoires passées de l'évolution de l'utilisation des terres et son déterminisme environnemental et humain ? L'approche historique est essentielle, l'héritage du passé constituant le point de départ de la situation actuelle, notamment de l'état des sols et de la biodiversité. Elle apporte des éléments de compréhension des moteurs de l'évolution de l'utilisation des terres pour le futur. Son agrégation à l'échelle d'une région est un défi à relever ;

– quelle est la traduction à l'échelle régionale de l'évolution de l'utilisation des terres en termes de flux de masse et d'énergie (transferts verticaux et horizontaux) ? Avancées nécessaires (i.e. améliorer la paramétrisation des modèles) sur le fonctionnement les éléments suivants : écosystèmes cultivés (spécificités : irrigation, drainage, albédo), zones urbaines, zones subissant des incendies, zones estuariennes, etc. ;

– comment s'intègrent dans l'espace régional les éléments du paysage ? Répondre à cette question nécessite de mettre en œuvre des approches pluridisciplinaires, sur quelques zones à patron d'évolution caractéristique ; centrer les recherches en s'appuyant sur une ou plusieurs zones-ateliers et sur les suivis cartographiques et/ou satellitaires. Associer les approches « passé-présent-futur », pour décrire les trajectoires et bâtir des scénarios (par exemple : les biocarburants et leurs impacts, ou la généralisation des OGM, etc.).

7 – CHANGEMENT D'UTILISATION DES TERRES

Le parti pris de cette prospective n'est pas de vouloir répondre à toutes les questions liées aux « impacts du changement global », mais plutôt de bien répondre à certaines. Un exemple parmi d'autres : quelles sont les conséquences de la fermeture des paysages (spécialisation des terres, retrait des cultures et des prairies, progression de la forêt), sur les flux radiatif et sur les cycles de 3 éléments clef du Système Terre : l'eau, le carbone et l'azote ? Répondre à cette question donne des éléments de décision non seulement localement par rapport au fonctionnement des populations, mais désormais au niveau régional voire planétaire vers une gestion intégrée du Système Terre. Les questionnements scientifiques et sociétaux suivant ont été élaborés à partir de l'identification des verrous des connaissances :

– quels sont les impacts à l'échelle régionale et planétaire de l'évolution de l'utilisation des terres qui affecte près de 2/3 des surfaces continentales ? Le changement global du fonctionnement du Système Terre est souvent restreint à l'étude des gaz à effet de serre sur le climat et ses conséquences, l'aspect régional et

8 – OBSERVATIONS DEPUIS L'ESPACE

Il y a peu d'aspects touchant à la structure et au fonctionnement des surfaces continentales auxquels la télédétection spatiale ne puisse apporter des informations utiles. C'est notam-

ment le cas de la Biodiversité pour laquelle la typologie des habitats et l'état des variables fonctionnelles constituent une base essentielle d'interprétation ; c'est aussi le cas des Changements globaux largement explicités par les modes de couverture et d'utilisation des terres (causes et conséquences) et dont on peut évaluer les impacts sur les variables d'état des surfaces. La télédétection spatiale prend une place de plus en plus grande dans les dispositifs d'observation, de compréhension et de modélisation des états des surfaces continentales et des processus auxquelles elles sont liées. Pour cela il faut pouvoir intégrer télédétection, caractérisation de la surface et modélisation.

Il s'agit d'abord de donner du sens au signal pour mieux accéder aux propriétés de la surface en :

- a) définissant des indicateurs innovants pour la caractérisation des paysages, la détection des changements, etc. ;

- b) améliorant l'inversion du signal en variables biophysiques en progressant sur :

- les modèles de transfert radiatif (en particulier par des modélisations 3D de la structure du couvert et de sa dynamique temporelle et par le développement de modélisations du sol),

- les méthodes d'inversion par l'utilisation d'informations exogènes, de contraintes spatiales et temporelles et le recours à des domaines de longueur d'onde variés pour aider à l'interprétation de signaux complexes, comme sur le sol par exemple.

Il s'agit ensuite d'améliorer la prise en compte de données spatiales dans les modèles de surface en travaillant sur :

- les liens entre variables accessibles et variables des modèles de fonctionnement ;

- l'assimilation de données de télédétection et de terrain pour l'initialisation, l'estimation des paramètres et la correction des modèles.

Le développement des concepts et des recherches fondamentales sur le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes nécessite un effort collectif de tous les chercheurs travaillant dans les domaines décrits plus haut, quel que soit le type d'écosystème et quelle que soit sa localisation géographique. Les méthodes à mettre en œuvre peuvent varier selon les objets d'études considérés, mais il est nécessaire que les fondements théoriques et les scénarios qui seront développés puissent être testés dans tous les types d'écosystèmes : c'est la première condition de leur fiabilité. De plus les conséquences des changements globaux que nous mesurons aujourd'hui montrent à quel point les milieux terrestres et aquatiques sont interdépendants. Par conséquent il est indispensable de favoriser les recherches sur des zones d'interfaces physiques, biologiques et sociales.

9 – LES ZONES D'OBSERVATIONS PRIORITAIRES

9.1 SYSTÈMES ET MILIEUX URBANISÉS

Les observatoires urbains interdisciplinaires sont apparus comme un atout fort pour engager des projets interdisciplinaires. De tels observatoires interdisciplinaires restent à créer, en s'appuyant sur des structures (sites expérimentaux, systèmes d'observation, etc.) existantes et en tirant parti des initiatives et expériences récentes. Ils permettraient de mettre en avant une méthode de travail ainsi que des priorités autour desquelles pourraient s'organiser les recherches interdisciplinaires sur le milieu urbain :

- i) les systèmes d'observation urbaine interdisciplinaires et durables ;
- ii) les scénarios de l'évolution des systèmes urbains ;
- iii) la modélisation de la ville ;

– iv) l'évaluation de l'action publique (tenant en considération l'environnement au sens large) ;

– v) les vulnérabilités et risques environnementaux en milieu urbain.

Ces cinq priorités couvrent des domaines assez vastes et doivent faire l'objet d'un effort complémentaire pour que des sujets et objets de recherche interdisciplinaires plus précis émergent. On peut cependant souligner qu'il existe déjà des travaux interdisciplinaires notamment sur l'hydrologie des bassins versants périurbains, et sur les conséquences des retombées atmosphériques sèches sur la qualité des eaux et des sols en ville ainsi que sur les réseaux trophiques.

changements globaux liés au climat, aux pressions anthropiques et à l'évolution des usages – en partant du constat que peu de systèmes sont aujourd'hui isolés d'un certain nombre de pressions et de tendances globales et que ces systèmes ont fortement évolué. On propose donc de privilégier 4 dimensions de ces systèmes : la dimension temporelle (évolution, variabilité), verticale (intégration des processus dans une approche système), transversale (continuum terre/littoral/océan) et horizontale (comparaison de systèmes), en considérant les échelles, modes et temps de réponse des socio-écosystèmes liés à un certain nombre de forçages. Cela implique nécessairement de prendre en compte :

– i) l'interdisciplinarité (biologie/physique, sciences environnementales/sciences humaines et sociales) ;

– ii) les interactions entre systèmes (côte/large, terre/littoral/côtier, colonne d'eau/sédiment, mer/atmosphère) ;

– iii) le couplage physique/biologie ;

– iv) les transferts d'échelle (mosaïque de systèmes, hétérogénéité spatiale).

9.2 INTERFACES CÔTIÈRES

L'atelier Interfaces Côtières propose de traiter les grandes questions spécifiques à l'interface continent-océan, au couplage bassin versant-zone côtière, dans le contexte des