

## SURFACE CONTINENTALE ET INTERFACES

*Présidente*

Pascale Bauda

*Membres de la section*

Anne Alexandre

Valérie Andrieu-Ponel

Cécile Bernard

Myriam Bormans

Gudrun Bornette

Thierry Bouvier

Yves Brunet

Christopher Carcaillet

Frédéric Delay

Valérie Demarez

Eléna Gomez

Gérard Gruau

Bruno Lanson

Jean-Paul Laurent

Sovan Lek

Nicole Mahr

Emmanuelle Montargès-Pelletier

Gilles Morvan

Philippe Peylin

Joëlle Templier

### PREAMBULE

Ce préambule a pour but d'exprimer les spécificités de la Section 20 en termes de laboratoires et de chercheurs représentés, ainsi que les besoins en personnels. La section, qui vit actuellement son second mandat, émane de la volonté conjointe des départements PU de l'INSU et SDV, puis EDD, de créer une section dédiée aux surfaces continentales et à leurs interfaces en y associant le vivant. Nous considérons cette nécessaire ouverture comme un moyen de faire évoluer les recherches dans le domaine de l'environnement. Actuellement, 1/3 des unités rattachées à la section dépendent de l'INSU et 2/3 de l'INEE. Parmi les chercheurs, 110 sont dans des unités rattachées à l'INEE et 108 dans celles dépendant de l'INSU ; 9 sont dans des unités dépendant d'autres instituts ou du ministère. Ces proportions illustrent l'activité de la section partagée entre INEE et INSU. De plus, 50% des chercheurs de la Section 20 sont dans des unités dont le rattachement principal n'est pas en 20. La pyramide des âges des chercheurs de la section est relativement équilibrée avec 15% des chercheurs dans la tranche 25-35 ans, 31% dans les 35-45 ans, 29% dans les 45-55 ans et 25% dans les 55-65 ans, avec une proportion de DR égale à 39%. En ce qui concerne le personnel technique, le soutien aux thématiques de recherches portées par la Section 20 rend incontournable un recrutement d'ingénieurs visant à conserver des compétences de bases (p. ex. compétences naturalistes), asseoir de nouveaux outils (p. ex. compétences en géochimie isotopique) ou développer des systèmes d'observation et d'expérimentation performants.

### 1 FLUX DE MATIERE ET D'ENERGIE, ALTERATION, EROSION, HYDROLOGIE

Comme c'est le cas pour beaucoup de systèmes dynamiques, les flux, dont on rappelle qu'il s'agit de l'intégrale d'une vitesse au travers d'une surface, sont assujettis dans leur évaluation et leur modélisation à des problèmes récurrents d'échelles spatiale et temporelle. Ceci posé, la recherche dans le domaine de la surface continentale et de ses interfaces (les « SIC » dans ce qui suit) s'avère suffisamment avancée aujourd'hui pour commencer à proposer des modèles sophistiqués de la dynamique des flux de matière et d'énergie. Ces modèles incluent hydrologie, altération – érosion, nutriments et polluants, et traitent aussi bien le transport solide que les flux chimiques dissous associés. Il n'en demeure pas moins qu'une grande partie des modèles proposés reste largement perfectible, dans la mesure où la prédiction de la dynamique des flux dépend à la fois des

processus considérés et du modèle utilisé. Cette dernière caractéristique rend éminemment difficile toute tentative de définir en quelques lignes des stratégies permettant d'améliorer la description et la prédiction des flux, tant ces stratégies sont liées aux types d'objets considérés et à la description conceptuelle et mathématique des mécanismes mis en œuvre.

Plutôt que d'émettre des recommandations nécessairement limitées car balayant un nombre trop restreint de cas, il nous a semblé plus judicieux de procéder à un inventaire des acquis et des verrous pouvant être levés dans le domaine.

## 1.1 DIFFICULTES GENERIQUES ET GRANDES QUESTIONS

Les « interfaces » au sens des SIC sont des surfaces mettant en relation des systèmes complexes aux comportements très différents : la basse atmosphère, l'océan, les enveloppes externes de la croûte continentale, la biosphère continentale. Cet ensemble forme un continuum dans lequel de nombreux processus physiques, chimiques et biologiques se déroulent sur de larges gammes d'échelles d'espace et de temps. Aux interfaces de « s'arranger » pour que la synergie de l'ensemble soit fonctionnelle ! Cette complexité des enveloppes et des interactions à prendre en compte fait que le domaine des SIC doit agréger des compétences et des protocoles particulièrement diversifiés. Par exemple, le cycle de l'eau est un facteur clé de la dynamique des flux en agissant comme agent (p. ex. altération) et comme vecteur (p. ex. transport sédimentaire). Ceci suppose des investigations à la fois très locales, par exemple la réactivité des minéraux à l'interface solide-liquide, et globale, par exemple la dynamique des pluies torrentielles de la mousson africaine, agent puis vecteur d'une érosion intense des sols. La première des grandes questions est de trouver le langage commun susceptible de faire échanger des communautés scientifiques parfois aux antipodes l'une de l'autre. Il est vraisemblable qu'à défaut de langage commun, le maintien sur le long terme de programmes nationaux de recherche fédérant les diverses communautés impliquées, et de sites ateliers ou expérimentaux partagés entre ces mêmes communautés, soit un bon palliatif.

Passée cette première difficulté de mariage d'échelles et de communautés, deux compartiments « vivants », ici dissociés, interviennent sur les processus générateurs de flux : la biosphère en général et l'anthropique. Les études antérieures se sont souvent focalisées sur les interactions biologique – biologique ou sur les effets des contraintes externes sur le biologique (dynamique des communautés, écologie fonctionnelle), laissant finalement assez peu abordée l'incidence du biologique sur des processus et mécanismes que l'on qualifiait, faute de connaissance, de physico-chimiques. Le rôle du vivant sur son environnement abiotique reste pour beaucoup à découvrir s'il est question de décortiquer des mécanismes locaux. De la même manière, le rôle de l'anthropisation des milieux n'est pas toujours très clair dès lors que sont recherchés ses effets rétroactifs sur les flux de matière et d'énergie, ou encore sur les grands cycles biogéochimiques. Pour

beaucoup, les premières difficultés sont locales : effet de catalyse ou d'inhibition de réactions physico-chimiques, de dégradation, de déformation d'un substrat, etc. La question principale devient ensuite globale : comment opérer un changement d'échelle sur les processus locaux pour produire des grandeurs assimilables à l'échelle des SIC, en occultant la spécificité individuelle ? Enfin, s'il est question d'évaluer des flux, le poids de l'hétérogénéité des milieux est souvent mal cerné, sans même parler des effets extrêmes et autres événements rares. Comment l'hétérogénéité à une échelle donnée peut-elle être prise en compte, voire quantifiée ? Un système hétérogène peut-il être considéré comme homogène au-delà d'une certaine échelle ?

Les progrès technologiques récents ont permis d'accroître le panel des outils d'observation et de mesure. La question souvent en suspens est de savoir quelle classe de problèmes les observations et mesures faites sont capables de conditionner. Fréquemment, il est procédé par investigations décorréelées alors que les variables mesurées, ou les problèmes, sont, eux, corrélés (p. ex. structure du biofilm dans un sol et vitesse moyenne de l'eau pour la fixation de l'azote). Là encore, le besoin de concertation entre communautés scientifiques semble évident afin d'aborder, sans prétendre à l'exhaustif, la complexité de questions telles que : comment les déterminants physiques, chimiques, biologiques des surfaces continentales transforment-ils les substances minérales et organiques pour « alimenter » les processus se déroulant aux sein des écosystèmes ? Comment ces mêmes déterminants régulent le transfert et le devenir des contaminants, sculptent les paysages continentaux et contrôlent les échanges avec l'atmosphère et l'océan ?

## 1.2 CE QUE LA RECHERCHE FRANÇAISE SAIT FAIRE

On constate, mais il ne s'agit que d'une tendance, que la recherche française sur les SIC est plutôt en avance sur le plan de la caractérisation et des mesures, alors qu'elle est plutôt en retard sur les aspects de modélisation, en particulier sous leur forme opérationnelle et disponible pour la société civile.

Assez paradoxalement, les flux d'eau et de matière semblent finalement aujourd'hui bien mieux contraints à l'échelle globale (même entachés d'erreurs et d'incertitudes) qu'ils ne le sont par exemple à l'échelle d'un petit bassin versant. On mettra cette singularité sur le compte d'une homogénéité trouvée à grande échelle, les grandes circulations atmosphériques, océaniques et hydrographiques y étant pour beaucoup. Incidemment, on peut souligner que la connaissance à grande échelle est incitatrice de nombreux travaux cognitifs de passage, statistique ou physique, vers des échelles plus petites, afin de dégrossir les évaluations que l'on souhaiterait obtenir localement.

Le même paradoxe existe pour la mesure des flux de chaleur et de vapeur d'eau à l'interface surface continentale – atmosphère si ces mesures sont intégrées à l'échelle du paysage. C'est en particulier le cas de la scintillométrie,

méthode directe d'estimation des flux de surface intégrés sur des distances allant de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres. Elle repose sur l'analyse des fluctuations que subit, sous l'effet des variations d'indice de réfraction le long d'un trajet, un signal électromagnétique émis à distance. Selon le domaine utilisé, optique (autour de  $0.8 - 0.9 \mu\text{m}$ ) ou microondes ( $27 \text{ GHz} \approx 10\text{-}2 \text{ m}$ ), sont accessibles respectivement les flux de chaleur sensible ou de chaleur latente. Au plan international les développements fondamentaux en scintillométrie ont été et restent le fait d'un nombre très restreint de laboratoires (Etats-Unis, Pays-Bas, Allemagne). En France, les travaux de l'Inra à partir du milieu des années 90, puis la commercialisation d'instruments dans le domaine optique, ont contribué à la diffusion de la méthode auprès de plusieurs laboratoires et à sa mise en œuvre sur le terrain (expériences Capitoul, bassins versants méditerranéens du Roujan et du Kamech, Amma, Flux-SAP, etc.), lui conférant ainsi un statut quasiment opérationnel sur certains types de surfaces. L'estimation du flux d'évaporation par scintillométrie microondes en est à un stade beaucoup moins avancé au niveau français comme au niveau international. Des travaux de validation ont débuté à l'aide d'un des rares instruments prototypes existants (construit par l'Université d'Eindhoven aux Pays-Bas). Devant la très forte motivation pour ce type de mesure un groupe est actuellement en train de se structurer en France en vue de développements méthodologiques et instrumentaux.

L'imagerie satellitaire fournit également des données relatives aux surfaces continentales, sur toute une gamme d'échelles. Aujourd'hui, elle permet notamment d'aborder avec une très haute résolution des questions comme la teneur en eau et l'occupation des sols, le suivi des états de surface. Des progrès importants ont été obtenus sur la cartographie des variables biophysiques par la mise au point de méthodes d'inversion (p. ex. réseaux de neurones) de variables biophysiques (indice foliaire, fraction absorbée de rayonnement actif pour la photosynthèse, taux de couverture du sol, etc.) à partir de données optiques, maintenant opérationnelles. La communauté dispose ainsi de cartes de variables biophysiques, à différentes échelles temporelles et spatiales (Modis, produits Geoland 2), mais qui ont encore besoin d'être validées aux échelles régionales et globales. Des développements sont en cours sur la cartographie de l'humidité du sol à partir de données radar, sur l'utilisation combinée de données radar et optique et sur la description fine de la structure verticale des « surfaces » continentales par la technique du Lidar (Light Detection and Ranging).

La communauté française est d'ailleurs particulièrement active pour contribuer à la définition de missions spatiales présentant un fort intérêt pour les surfaces continentales, à fine échelle (Venüs, Mistigri, Biomass, etc.) comme à plus grande échelle (SMOS, SWOT, etc.). Cet intérêt est pour l'essentiel le fait des longueurs d'onde utilisées, des résolutions spatiales et des temps de revisite, et enfin des combinaisons multispectrales et multicateurs possibles. L'accès à la haute résolution dans l'infrarouge thermique par exemple (projet Mistigri) devrait apporter une source considérable d'informations pour les SIC. Il devrait permettre, entre autres, d'accéder aux bilans radiatifs et énergétiques en contexte urbain ; le paysage urbain,

véritable écosystème complexe à caractère fortement transitoire et hétérogène (flux thermiques, gazeux, bilans énergétiques, etc.), tire d'ailleurs véritablement partie de l'imagerie à très haute résolution et, de ce point de vue, contribue largement à l'amélioration des connaissances sur les effets de l'anthropisation (voir questions générales plus haut).

La technique générique du traçage a beaucoup progressé ces dernières années. On pense en particulier aux isotopes dans le traçage de l'eau, du carbone et des nutriments le long du continuum sol – plante – atmosphère, ou dans le traçage des sources d'éléments qui marquent l'origine des matériaux, leurs voies d'altération, etc. Les outils isotopiques contribuent également à l'évaluation des temps de transfert dans l'hydrosphère et l'atmosphère avec, là encore, des résultats d'autant moins critiquables qu'ils s'adressent aux grandes échelles. D'autres outils de traçage contribuent également à la caractérisation des flux et à l'origine des matériaux. On citera en particulier les outils moléculaires développés et appliqués au traçage de l'origine et du cycle de la matière organique dans les sols et dans les eaux.

A l'échelle locale, la réactivité des surfaces minérales et organiques élémentaires est un secteur qui a énormément progressé. On est aujourd'hui capable de conceptualiser puis d'écrire des modèles de réactivité intégrant une physique très sophistiquée. Beaucoup d'efforts sont faits pour passer de l'échelle nanométrique à l'échelle micrométrique, mais la hiérarchisation des mécanismes mis en jeu reste difficile, principalement à cause de l'hétérogénéité et de la complexité des systèmes. En d'autres termes, pour des problèmes de transport réactif dans les sols, les hydrosystèmes souterrains et le réseau hydrographique, le passage de l'échelle moléculaire à celle qui est pertinente pour le transport n'est pas encore fait. Cela étant, la modélisation du transport avec couplage de réactions macroscopiques (pouvant d'ailleurs inclure en partie les effets du vivant) a bien progressé. L'exemple réactivité locale – transport réactif macroscopique est symptomatique de la nécessité évoquée plus haut de trouver un langage commun pour des communautés ayant jusque là développé leurs recherches séparément.

En termes de modélisation, l'assimilation de données et l'inversion de problèmes à grande échelle a véritablement avancé, avec dans les cas particuliers de la météorologie et climatologie, un véritable « plus » apporté par la communauté française. De fait, on est aujourd'hui capable de développer des modèles atmosphériques globaux, à dynamique fortement transitoire. On pourrait placer des bémols par endroits (p. ex. génération de la pluie, des éclairs...) mais ils concernent souvent des événements extrêmes pour lesquels l'absence de description représentative reste un frein. La modélisation atmosphérique à fine échelle (canopée, paysage, petite région) a également fortement progressé, grâce notamment aux avancées de la simulation LES (*Large-Eddy Simulation*, ou simulation des grandes échelles), dont la résolution spatiale permet de prendre en compte explicitement les hétérogénéités de surface dans divers contextes (couverts complexes, paysages fragmentés, relief, bientôt atmosphère urbaine...).

Enfin, les choses ont bien progressé dans le domaine de la description de l'hétérogénéité par des modèles synthétiques intégrables à des modèles de processus, pour des milieux comme la surface du sol (cf. télédétection à très haute résolution), les sols et les réservoirs souterrains. La modélisation à échelle fine des écoulements dans les réservoirs souterrains et les petits bassins versants a suivi la même évolution positive. Cette progression n'atteint cependant pas le degré de précision requis pour permettre l'intégration par exemple des effets d'hétérogénéité chimique, minérale et biologique sur le couplage transport – réaction. Peut-être faut-il repenser le problème en termes d'*upscaling* (approche d'agrégation ascendante) afin de rendre compatible l'échelle de description des hétérogénéités et celle à laquelle on simule correctement le couplage.

### 1.3 LES VEROUS OUVRABLES A COURTS ET MOYENS TERMES

Le couplage atmosphérique – souterrain pour les flux d'eau et de matière est globalement réalisable à moyen terme. Les mesures indirectes relatives aux flux d'eau dans le sous-sol (hydrogéophysique *sensu lato*) avancent et se joignent aux mesures de surface et d'imagerie satellitaire pour proposer un conditionnement cohérent en termes de description d'hétérogénéité et de taille de support de mesure. Ce pré-requis à l'élaboration des modèles couplés surface – souterrain dépend cependant fortement des progrès numériques attendant à l'assimilation ou l'inversion, mais également aux capacités de décomposer des domaines spatio-temporels afin de rendre les calculs réalisables sans propager des erreurs grossières. Plusieurs initiatives sont en cours dans ce sens, autour de plates-formes de modélisation.

La dynamique des fluides et les bilans énergétiques semblent accessibles au droit des paysages urbains, ouvrant la porte à la réalisation de projections pour un meilleur aménagement de ces paysages. Le même schéma semble se dessiner pour les paysages ruraux avec notamment de nombreux travaux sur leur connectivité, l'incidence de cette connectivité sur les flux, les capacités à spatialiser des modèles locaux (p. ex., érosion, écoulement de bassin versants, etc.) et à les faire « dialoguer » entre eux. A noter que les progrès des méthodes d'assimilation, d'agrégation et de désagrégation de données devraient permettre à terme de spatialiser de manière quasi-opérationnelle, à l'échelle de ces paysages, les modèles de fonctionnement des interfaces sol – végétation – atmosphère.

Le paradoxe déjà évoqué de disposer d'informations pertinentes sur les flux de matière et d'énergie à l'échelle globale plus qu'à l'échelle d'un petit bassin versant (incluant le réseau hydrographique, le sol, la zone vadose et l'éventuelle nappe d'accompagnement) devrait trouver une solution, et ce pour les mêmes raisons que celles évoquées à propos des progrès réalisés en imagerie à haute résolution et en approches numériques. Ce sont pour l'essentiel des problèmes de spatialisation de l'information locale et de gestion de temps caractéristiques contrastés entre processus qui nuisent à une bonne intégration des flux de matière et d'énergie à l'échelle

du petit bassin versant. Il reste cependant à développer un réseau national d'observations, ou des observatoires régionaux, orientés sur la dynamique et la physique des systèmes. Les observatoires régionaux apparaissent comme une nécessité pour évaluer les performances des modèles de fonctionnement alimentés par les données de télédétection.

Enfin, malgré les difficultés de « transfert » entre communautés scientifiques, l'*upscaling* de la réactivité à l'échelle nanométrique de surfaces minérales et organiques et le système réactif macroscopique (couplé au transport) est accessible. Un chantier prometteur semble être celui des interactions minéral – microfaune – bol racinaire – sol. On peut penser que le couplage entre des modèles thermodynamiques et une dynamique d'écoulement est susceptible de faire le pont entre les échelles.

## 2 BIODIVERSITE, ECOLOGIE DES COMMUNAUTES, FONCTIONNEMENT DES ECOSYSTEMES

Dans le cadre de la Section 20, cette thématique s'attache à identifier et quantifier les mécanismes et les processus reliant la structure et le fonctionnement des écosystèmes. Plus particulièrement elle vise à déterminer (i) comment le contexte environnemental *sensu lato* (variabilité spatiale et temporelle de l'habitat physique et chimique) modifie la structure et la dynamique des populations, guildes ou communautés, ainsi que les interactions entre organismes, et (ii) comment, en retour, ces communautés, caractérisées par leur diversité spécifique ou fonctionnelle, structurent et modifient l'habitat ainsi que les transferts de matière et d'énergie. Les fonctions cibles sont donc celles agissant directement ou indirectement sur l'habitat et les flux des éléments.

### 2.1 FORCES DE LA RECHERCHE FRANÇAISE

Les forces de la recherche française dans ce champ sont structurées en équipes abordant soit la réponse des communautés vivantes aux contraintes de l'habitat (en termes de richesse spécifique et de traits biologiques), soit l'action des organismes et leurs interactions, tant biotiques qu'avec le milieu, sur le fonctionnement et les propriétés des écosystèmes. Plusieurs laboratoires étudient spécifiquement la relation entre traits de réponse et traits d'actions, en se focalisant sur les fonctions liées aux cycles de l'azote et du carbone, à la dégradation de la matière organique ou à l'épuration biologique. Dans ce contexte, les atouts séduisants des organismes microscopiques pour valider certains concepts d'écologie théorique ont poussé les écologues théoriciens et expérimentaux, notamment les microbiologistes, à se retrouver sur un terrain pluridisciplinaire. Cette interface entre théorie et écologie des communautés, des microbes et des organismes dits supérieurs est fructueuse. Aujourd'hui, il est nécessaire de poursuivre cette démarche. Cependant, la simplification des dessins expérimentaux, nécessaire à une déconvolution des processus, se heurte trop souvent à la difficulté d'extrapoler à la réalité *in situ*. Ceci est

en partie dû au fait qu'une relation écologique chez un modèle biologique ne peut être que partielle chez un autre modèle. D'autre part, deux modèles biologiques différents peuvent s'exprimer sur des parties distinctes d'un même gradient écologique. Enfin, les divers modèles biologiques (plantes, animaux, insectes, unicellulaires) opèrent à des échelles de temps et d'espace différentes, ajoutant une complexité à l'extrapolation des résultats à l'écosystème. Ainsi, des interprétations générales peuvent par exemple conduire à de fausses conclusions sur le fonctionnement des écosystèmes. Un des enjeux futurs sera de confronter les réponses écologiques potentielles détectées au laboratoire à celles réalisées *in situ*.

Plusieurs équipes se focalisent sur l'impact de la structure de l'habitat (p. ex. connectivité, fragmentation) sur la biodiversité, et les conséquences des altérations de cette structure (et des tentatives de restauration) sur les fonctions assurées par les paysages au regard essentiellement de la conservation des populations et des communautés, mais parfois également de certains processus (épuration, puits de carbone p. ex.). Une réflexion dynamique, reposant sur la modélisation couplée à des expérimentations, porte également sur les problématiques concernant la résistance des systèmes écologiques (structure, fonctions, interactions) aux altérations de l'environnement, en tentant d'établir le rôle de la diversité spécifique et fonctionnelle et de la complexité des réseaux trophiques. Le développement rapide de la génomique environnementale va également permettre d'élucider les liens entre biodiversité et fonctions dans des contextes d'environnements complexes.

Les problématiques relatives au changement global sur la biodiversité (en incluant les phénomènes d'invasion) et les fonctions associées sont particulièrement étudiées. Enfin, de nombreuses recherches se construisent dans le champ de l'écologie de la restauration, en mettant en place des expérimentations en vraie grandeur destinées à tester des hypothèses émises sur le fonctionnement et la résilience des écosystèmes. Ce champ en émergence est encore dans une phase d'élaboration d'un cadre conceptuel, mais il devrait progresser rapidement en tirant partie de la demande sociétale croissante de restauration des écosystèmes altérés par les actions anthropiques et les fonctions associées.

Enfin, des programmes de recherche voient le jour avec l'objectif d'appréhender conjointement les services écosystémiques et les fonctions écologiques dans une même démarche transversale, et intégrant la perception sociétale de ces fonctions. Même si la traduction de ces programmes en réflexions interdisciplinaires est là aussi en gestation, les démarches mises en place par le CNRS et visant à soutenir les projets d'ingénierie écologique sont extrêmement positives. Elles encouragent en effet la mise en place d'outils de restauration et de gestion des écosystèmes reposant sur les résultats les plus récents de la recherche. Ceci devrait à terme permettre (i) le développement de modèles et de théories relatives à l'ingénierie écologique et à l'écologie de la restauration, modèles encore très rares aujourd'hui, et (ii) une meilleure articulation de ces modèles avec les théories et les modèles relatifs au fonctionnement des écosystèmes.

## 2.2 FAIBLESSES

Les démarches de construction des typologies de fonctionnement des écosystèmes, reposant notamment sur la complexité et la diversité de leurs fonctions, restent encore balbutiantes. De nombreuses approches s'appuient en effet sur des démarches expérimentales – souvent coûteuses – et des écosystèmes pilotes, et sont destinées à décrypter des mécanismes plus qu'à fournir des modèles exhaustifs. De tels modèles sont pourtant nécessaires pour (i) tester, valider ou invalider les modèles construits en écologie fonctionnelle, et (ii) aider les gestionnaires de l'environnement à gérer de manière raisonnée les écosystèmes ou à les restaurer de manière performante.

Les études concernant le changement global intègrent encore peu le passé. C'est le cas notamment des études rétrospectives du fonctionnement des écosystèmes, même si se dessinent progressivement des communautés scientifiques qui interagissent à des échelles de temps différentes autour de ces questions. Dans ce contexte, les réflexions visant à concilier les démarches et les concepts de l'écologie fonctionnelle avec ceux de l'écologie évolutive sont essentielles, en particulier (i) pour appréhender la vulnérabilité aux altérations environnementales des espèces et des communautés constituant les systèmes écologiques, et (ii) pour déterminer le potentiel d'adaptation de ces mêmes communautés et donc la conservation des fonctions qui leur sont associées.

Enfin, les approches interdisciplinaires, même si elles constituent le cœur de la section, sont encore en construction et devraient se développer dans l'avenir, au fur et à mesure que seront résolues les difficultés liées aux changements d'échelle et aux différences d'angle de perception entre champs disciplinaires. On peut citer à titre d'exemple les difficultés à transposer *in situ* les recherches en écotoxicologie réalisées au laboratoire. La raison tient à l'exposition des écosystèmes, dans les situations naturelles, à des mélanges complexes de polluants, combinés à des altérations physiques des habitats (voir chapitre 3).

## 2.4 BESOINS

Les expériences à grande échelle et multi-compartiments sont de plus en plus nécessaires, et requièrent une meilleure articulation entre les opérations de génie écologique, de restauration écologique, et les questionnements des chercheurs de nos domaines. De nombreuses opérations sont ainsi conduites sans le cadre scientifique rigoureux qui permettrait d'en valoriser pleinement les résultats, en particulier en termes d'élucidation du fonctionnement des écosystèmes face à des altérations de grande ampleur. Outre la rigueur du suivi scientifique, il manque à la plupart de ces opérations une analyse interdisciplinaire de l'objet écologique. Une telle démarche devrait reposer sur la construction d'une réflexion conjointe entre scientifiques et gestionnaires, intégrant la mise en place d'un phasage et la construction d'équipes interdisciplinaires autour de l'analyse de ces opérations.

### 3 ECOTOXICOLOGIE, DYNAMIQUE DES ELEMENTS ET DES CONTAMINANTS, PHYSICOCHIMIE DES INTERFACES, BIOGEOCHIMIE

Le devenir des éléments et des contaminants est, pour l'essentiel, contrôlé par leurs interactions complexes et multiples avec les constituants fluides, minéraux, organiques et vivants des formations continentales superficielles. Sous le terme de « contaminants » sont inclus les composés chimiques d'origine anthropique ou naturelle, mais également les agents biologiques, pathogènes ou produisant des toxines, dont la dynamique est liée aux processus croissants d'anthropisation. Dans une optique de développement durable, la compréhension du devenir des éléments « nutritifs » doit également être considérée.

Dans le contexte écodynamique, le devenir des éléments et des contaminants recouvre la distribution aussi bien spatiale que temporelle et les modifications de leur forme chimique et structurale (spéciation). L'écodynamique des contaminants est une question en partie couverte par le chapitre de ce rapport dédié aux flux ; cet aspect ne sera donc pas repris ici.

Le devenir des contaminants conditionne leur disponibilité, leurs effets sur le vivant ainsi que leurs conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes. La compréhension des mécanismes contrôlant la dynamique et l'impact des contaminants est donc un enjeu de la plus grande importance dans le contexte des services écologiques (préservation, altération, remédiation). Cet enjeu sous-entend également la capacité à décrire les processus impliqués et leurs facteurs de contrôle par une approche de modélisation.

La compréhension de ces processus nécessite d'en appréhender les mécanismes à l'échelle la plus élémentaire. Ceci concerne aussi bien la physicochimie des interfaces que la biogéochimie, et met en jeu un ensemble d'interactions avec et entre les systèmes biologiques. Les mécanismes moléculaires impliqués se répercutent en effet à tous les niveaux d'organisation biologiques jusqu'à la modification du fonctionnement des écosystèmes et de la biosphère. Une telle compréhension est nécessaire pour fonder la modélisation des systèmes complexes sur des bases mécanistes afin de minimiser la perte d'information lors des nécessaires changements d'échelles.

En tant qu'interface essentielle entre les processus biologiques, chimiques et physiques, la fine pellicule soutenant le développement biologique à la surface de la Terre définit le cadre spatial de ces recherches. Dans cette zone, fréquemment dénommée « zone critique », l'homme est à prendre en compte, non seulement en tant que cible directe de contaminants, comme l'étudie la toxicologie, mais également en tant que maillon terminal des réseaux trophiques et organisme vivant, acteur et perturbateur.

### 3.1 LES LIMITES DES APPROCHES ACTUELLES ET LES VEROUS A LEVER

Une des difficultés rencontrée dans l'étude de la zone critique réside dans son hétérogénéité et sa complexité intrinsèque à toutes les échelles, y compris les plus fines. Cette complexité s'ajoute au caractère dynamique des systèmes considérés. Ces deux spécificités limitent non seulement notre capacité à les reproduire expérimentalement mais également notre capacité à les modéliser. Dans cette perspective, il apparaît donc particulièrement pertinent de :

- mieux utiliser les observations faites, y compris aux échelles les plus fines, pour les intégrer dans la dynamique d'évolution des systèmes ;
- effectuer des aller-retours entre les observations *in situ* et les systèmes analogues simplifiés pour mieux orienter les expérimentations en laboratoire ;
- hiérarchiser les processus impliqués sur la base des lois physiques qui les contrôlent pour fonder l'approche modélisatrice de la façon la plus pertinente possible ;
- intégrer l'organisation biologique et en particulier comprendre et modéliser les mécanismes moléculaires d'interaction des contaminants avec les molécules du vivant ;
- gérer les changements d'échelles spatiales et en particulier améliorer la description à l'échelle du mm ou cm, qui est celle de l'homogénéisation ;
- prendre en compte les aspects dynamiques ainsi que les rythmes biologiques et leur incidence sur la dynamique de spéciation des éléments.

Le plus souvent, les composants de la zone critique sont en effet considérés comme immuables alors que les changements d'usage et les modifications des flux élémentaires, en particulier des nutriments et des contaminants, vont influencer sur les diversités organo-minérales et biologiques. Dans cette perspective, l'étude d'analogues naturels (anomalie géochimique pour les éléments trace p. ex.) pourrait permettre de mieux comprendre, sinon les processus d'évolution, du moins le devenir ultime des éléments et des contaminants dans un système naturel complexe, et donc de mieux cibler les systèmes et les processus pertinents. L'utilisation de traceurs comme les isotopes stables permet également de mieux prendre en compte la dynamique de ces systèmes.

La multiplicité des interactions, caractéristique de la zone critique, est d'autant plus difficile à étudier dans le cas fréquent des pollutions diffuses où des sources multiples de contaminants divers s'ajoutent au fond géochimique. Dans ce cas, les interactions entre contaminants doivent être prises en compte. Pour mieux les expliciter, les isotopes stables et leur fractionnement peuvent s'avérer utiles en tant que traceurs des éléments et des réactions ; leur utilisation est à développer. Il est aussi nécessaire d'améliorer notre connaissance de la structure et de la composition chimique des matières organiques naturelles et en particulier celle des fractions macromoléculaires, les interactions avec les molécules simples étant mieux documentées. Enfin, la compréhension des interactions avec le vivant comme composant actif de ces milieux reste

insuffisante.

Une autre difficulté provient de ce que les études menées sur cette zone critique l'ont souvent été de manière disciplinaire ou en découplant les différents compartiments. Un des objectifs semble donc de réunir sur un même site, ou autour d'un objet commun, des compétences diverses permettant la pluridisciplinarité qu'impose la complexité des systèmes étudiés. Il apparaît par exemple nécessaire de renforcer les connaissances relatives aux couplages entre les processus physiques, chimiques et biologiques agissant au sein d'un même compartiment et à leurs conséquences en termes de flux et de bilans. Le couplage entre cycles hydrologiques et géochimiques apparaît ainsi comme essentiel. Il est nécessaire d'intégrer la dynamique du vecteur de transfert des éléments et des contaminants, souvent considérés comme immobiles, pour modéliser leur devenir.

Enfin, le passage des observations aux très petites échelles (nano ou micro, moléculaire ou individus pour le vivant) vers des échelles intermédiaires (mm ou cm, populations ou communautés pour le vivant) ou plus vastes (bassins versants, écosystèmes) reste une question ouverte.

### 3.2 LES FORCES EXISTANTES

Dans le contexte international la France accuse globalement un retard dans l'étude de la zone critique. Dans ce domaine les Etats-Unis sont clairement en tête, suivis par les Canadiens et, en Europe, la Grande-Bretagne et les Pays-Bas. Le retard français est principalement dû à :

- une gestion disciplinaire de la recherche (au niveau des laboratoires, des départements, parfois des universités) ;
- la multiplicité des établissements impliqués qui renforce le cloisonnement ;
- le cloisonnement entre les formations ingénieur et universitaire, qui pourrait cependant s'atténuer dans le contexte d'évolution des campus.

Pour ces raisons nos forces sont donc essentiellement disciplinaires, alors que nos faiblesses portent surtout sur la difficulté à faire converger ces compétences disciplinaires sur des problématiques environnementales.

Au cours de la dernière décennie, une large palette d'instruments a été développée. On peut entre autres citer les outils qui permettent désormais d'obtenir avec une résolution spatiale sub-micrométrique les caractérisations physiques et chimiques anciennement limitées aux seuls échantillons macroscopiques. De telles techniques sont efficaces pour comprendre les interactions solide-solution sur des systèmes analogues et contrôlés. Elles permettent également de faire un bilan statique de la distribution et de la spéciation des contaminants lourds (métaux, métalloïdes) dans un milieu hétérogène. A ces techniques d'imagerie chimique s'ajoute le développement de méthodes électrochimiques, spécifiquement dédiées à une meilleure perception de la dynamique de spéciation des éléments métalliques aux interphases colloïdales. L'étude des contaminants organiques et autres xénobiotiques, reposant à l'heure actuelle sur les techniques de séparation (chromatographie), reste fortement dépendante des

développements méthodologiques et notamment de la mise en œuvre de nouveaux systèmes de détection. Le suivi des contaminants organiques est également tributaire de la compréhension des séries de réactions de dégradation et d'altération.

L'écotoxicologie, pour des raisons historiques liées à l'émergence de cette discipline, évolue vers une plus grande interdisciplinarité et se structure au niveau national. Cette ouverture est à poursuivre et à encourager afin de résoudre la question de *l'upscaling* des données aux différents niveaux d'organisation du vivant.

Des forces existent en France en écologie fonctionnelle et en écologie théorique qui devraient s'appliquer au cours des prochaines années à l'écotoxicologie. Nous savons caractériser le fonctionnement des écosystèmes dans des conditions données où les principaux processus fonctionnels peuvent être quantifiés, parfois modélisés, mais sans prendre en compte la pression anthropique en tant que forçage. Dans ces disciplines il faut également mieux intégrer les flux.

Des plates-formes de génomique et post-génomique performantes existent mais les outils sont encore en évolution et les approches restent coûteuses. Des supports financiers devraient être négociés pour développer ces approches qui concourent à une meilleure description de la biodiversité et de ses altérations, ainsi qu'une meilleure évaluation de l'impact des contaminants sur l'expression des gènes, des protéines et des métabolites ayant des conséquences sur les niveaux supérieurs d'organisation du vivant. La masse de données nouvelles générée par ces approches devrait permettre de faire évoluer nos questionnements, voire engendrer de nouvelles interrogations.

## 4 IMPACT DES CHANGEMENTS GLOBAUX, PALEOECOLOGIE, PALEOENVIRONNEMENTS CONTINENTaux ET COTIERS

Une connaissance approfondie des processus environnementaux modifiant le fonctionnement des écosystèmes terrestres, lagunaires et côtiers est un pré-requis essentiel pour améliorer les prédictions environnementales à court et long terme et in fine évaluer leurs impacts potentiels sur les sociétés. Cette connaissance passe par :

- la compréhension des mécanismes interagissant entre les principales composantes des écosystèmes (substrat, fluides, végétation, faune) sous l'effet des changements naturels et anthropiques (y compris climatiques), la quantification de ces changements, la connaissance de leur niveau d'organisation et la capacité à les modéliser ;
- l'élaboration d'indicateurs synthétiques et de modèles intégrés (couplant les différentes composantes) robustes permettant de comprendre et prédire la dynamique des écosystèmes continentaux et côtiers.

La France affiche un fort potentiel sur certains points cruciaux tels que :

- l'étude des structure et fonctions des communautés et du fonctionnement des écosystèmes et de leurs réponses aux forçages environnementaux biotiques et abiotiques ;
- l'impact des changements globaux sur la dynamique des écosystèmes côtiers ;
- le développement d'indicateurs quantitatifs des changements au sein des écosystèmes et l'acquisition des données que ces indicateurs agrègent ;
- la modélisation « disciplinaire » des composantes de ces écosystèmes (p. ex. fonctionnement des plantes, hydrologie...);
- la modélisation climatique régionalisée.

Des approches complémentaires, dont le développement est international, méritent en outre d'être encouragées :

- l'accroissement de la connaissance des interactions présentes et passées entre les différentes composantes des écosystèmes continentaux, leur quantification et leur modélisation. Par exemple, il serait judicieux de développer la quantification de l'impact des changements globaux et l'incidence des variables biotiques et abiotiques régionales ou locales sur les écosystèmes. A l'échelle régionale, l'intégration de différentes approches disciplinaires autour d'observatoires spatiaux régionaux ou de bassins versants instrumentés devrait favoriser l'étude de ces interactions ;
- le développement d'indicateurs synthétiques et quantitatifs des changements continentaux aux échelles planétaires mais aussi locales et l'élaboration de bases de données inter-opérationnelles ;
- le renforcement de l'acquisition de données biologiques et géochimiques par l'augmentation de la résolution temporelle de séquences paléoenvironnementales clés, mais aussi l'étude de zones géographiques pour lesquelles on dispose de peu de données (p. ex. zone inter-tropicale, Moyen-Orient, hautes latitudes) ;
- l'amélioration des outils (dont la datation radiocarbone) permettant des comparaisons chronologiques robustes entre les enregistrements paléo-environnementaux ;
- la caractérisation du rôle des extrêmes climatiques et de leur fréquence dans la modification des écosystèmes terrestres ; seraient alors mis en avant l'existence de seuils dans la réactivité des systèmes, les effets d'hystérésis dans leur capacité à revenir à un état standard, etc. ;
- l'amélioration de la représentation de la biodiversité et de ses fonctionnalités dans les modèles utilisés pour comprendre et prédire les changements globaux (p. ex. DGVMs, ou *Dynamic Global Vegetation Models*) ;
- le développement dans la modélisation des approches ascendantes d'agrégation (*upscaling*, combinant connaissances locales et informations spatiales) et descendantes de désagrégation (*downscaling*) ainsi que l'estimation des incertitudes associées aux processus et à leur propagation.

## 5 LES OUTILS NECESSAIRES

### 5.1 DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET PLATES-FORMES ANALYTIQUES

Les dispositifs expérimentaux de type micro- et mésocosmes sont indispensables pour élucider la plupart des verrous scientifiques évoqués. L'échelle du

mésocosme est très importante car elle permet de créer un niveau de complexité intermédiaire entre le terrain et le laboratoire où toutes les conditions sont contrôlées. Ce niveau intermédiaire est indispensable pour tester des hypothèses émises à partir de données obtenues dans des conditions soit plus complexes soit entièrement contrôlées.

Dans ce contexte, ni le morcellement des plates-formes expérimentales de petite taille ni leur concentration autour de plates-formes de très grande taille ne sont souhaitables. En effet, la mise en place d'expérimentations sur des organismes vivants n'est pas toujours transposable d'une aire géographique à l'autre. Par conséquent, ces outils doivent concilier des contraintes variées afin de répondre de manière opérationnelle, et pour un coût raisonnable, aux questionnements relevant de catégories d'organismes et d'habitats contrastés.

Les pistes offertes par les écotrons sont également souhaitables pour aborder la problématique des flux sur les SIC. Ceci devrait rapidement permettre de transposer des expérimentations intégrant le vivant à des mises en conditions de forçage contrôlées mais comparables au milieu naturel. Compte tenu de leur coût, les écotrons en cours de développement sont *a priori* suffisants. Des modalités d'accès sur projet doivent être établies, sur le modèle de ce qui se pratique sur d'autres grands instruments.

Les synchrotrons font partie des outils performants, et en plein développement, pour l'imagerie aux petites échelles et la détermination des environnements atomiques de contaminants inorganiques ou d'éléments. Les efforts actuels pour imager les contaminants les plus pertinents et pour faciliter ou améliorer la description d'objets naturels hétérogènes sont à soutenir.

Par ailleurs, une modernisation des protocoles et équipements permettant la datation <sup>14</sup>C en France est aujourd'hui nécessaire afin de répondre à l'évolution des besoins de la communauté nationale et au maintien de sa compétitivité, notamment d'un point de vue qualitatif (taille des échantillons, datation sur composés spécifiques).

Enfin, il est souhaitable de faciliter l'accès aux plates-formes de génomique et post-génomique dédiées à nos questions, en le soutenant par des actions programmatiques.

## 5.2 SOUTIEN A L'INTERDISCIPLINARITE

Il est important pour les thèmes de la section d'agréger des compétences disciplinaires multiples autour de sites ou d'objets spécifiques. Cette agrégation de compétences nécessite des sites ou objets d'étude communs à plusieurs disciplines, ainsi que des actions programmatiques interdisciplinaires récurrentes. Les thématiques relevant de la Section 20 ne sont pas exclusives au CNRS mais largement partagées avec les chercheurs des établissements (IRD, Inra, Cirad, Cemagref, Ifremer, CEA, Cnes, Universités, etc.), qui travaillent sur des chantiers et programmes communs, ou

au sein d'unités communes. Cette agrégation doit donc bien entendu impliquer l'ensemble des acteurs et devrait être facilitée par la mise en place des alliances. Pour un réel succès il faut combiner des compétences disciplinaires fortes et la capacité à comprendre les différents aspects interdisciplinaires d'une question. Ceci nécessite un effort d'ouverture coûteux en temps et trop souvent négligé, voire exclu, en raison de la pression de production exercée sur les chercheurs et les doctorants. Ces efforts, imposés par la construction d'un dialogue interdisciplinaire autour d'objets communs, mais souvent vus à des échelles ou sous des angles très différents, portent progressivement leurs fruits.

L'émergence de formations interdisciplinaires ou au moins bidisciplinaires adaptées aux problématiques environnementales devrait aider dans ce sens. Actuellement, les formations interdisciplinaires (regroupant par exemple sciences de la terre, écologie, biologie, chimie) sont en nombre très faible avec pour conséquence un vivier restreint de candidats au doctorat, post-doctorat, voire aux concours de chercheurs, formés pour appréhender les écosystèmes et les hydrosystèmes dans leur ensemble. Dans cette perspective, les outils tels que les DIPEE mis en place par l'INEE s'avèrent essentiels.

Les sites des laboratoires devraient être inventoriés dans une base de données, telle que celle en cours dans le cadre du réseau des bassins versants. Les sites des fédérations, des OSU, de même que les ZA et les SOERE sont également utiles pour fédérer les actions et doivent être pérennisés au moins à moyen terme.

En ce qui concerne les actions programmatrices pluridisciplinaires, EC2CO est devenu un support efficace et indispensable de la recherche en environnement. Il est nécessaire de pérenniser ce type de programme pluridisciplinaire, mais également de lui donner les moyens d'être un peu plus qu'un support incitatif, notamment pour quelques projets cognitifs « amonts » qui s'accommodent assez mal d'une contractualisation de courte échéance. Les GDR (Groupements de Recherche) sont également des outils structurants, autour de thématiques plutôt que de sites, permettant d'agréger les compétences nécessaires pour répondre à des questionnements. Il est dommage que le financement de ces structures ait été revu à la baisse ces dernières années. Il ne serait d'ailleurs pas inintéressant de redévelopper des structures fédératrices de type GDR autour d'un ou plusieurs SOERE avec la charge de valoriser scientifiquement les données acquises (exercices communs de modélisation, inter-comparaison d'approches météorologiques, confrontations d'approches théoriques, etc.)

### 5.3 BESOINS EN PERSONNELS

Les unités font face à un manque croissant de soutien technique dans le domaine de l'acquisition des données et de la modélisation. La création de plates-formes techniques (p. ex. bio-indicateurs et microscopie ; traçage géochimique ; expérimentations en conditions contrôlées ; programmation) au sein des unités permettrait de mieux valoriser les compétences des personnels techniques et d'optimiser les interactions entre ces derniers, les

étudiants et les chercheurs. Elle ne pourra cependant pallier le manque évident de ces personnels.

#### ANNEXE

Amma : Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine <http://www.amma-international.org>

Biomass : Biomass monitoring mission for Carbon Assessment <http://www.cesbio.ups-tlse.fr/fr/indexbiomass.html>

Capitoul : Canopy and Aerosol Particles Interactions in TOulouse Urban Layer <http://medias3.mediasfrance.org/capitoul/index.jsp>

DIPEE : Dispositifs de Partenariat en Ecologie et Environnement

EC2CO : Écosphère Continentale et Côtière <http://www.cnrs.fr/prg/PIR/programmes-termines/ec2co/ec2co.htm>

Flux-SAP : Secteur Atelier Pluri-disciplinaire [http://www.irstv.cnrs.fr/article.php3?id\\_article=113](http://www.irstv.cnrs.fr/article.php3?id_article=113)

Mistigri : MicroSatellite for Thermal Infrared GRound surface Imaging <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009SPIE.7453E...6T>

Modis : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer <http://modis.gsfc.nasa.gov/>

OSU : Observatoires des sciences de l'Univers <http://www.insu.cnrs.fr/co/osu/osu-observatoires-des-sciences-de-l-univers>

SMOS : Soil Moisture and Ocean Salinity <http://smos.cnes.fr/SMOS/Fr/>

SOERE : Systèmes d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement

SWOT : Surface Water Ocean Topography <http://bprc.osu.edu/water/>

Venüs : Vegetation and Environnement monitoring on a New Micro-Satellite <http://www.cesbio.ups-tlse.fr/fr/mission1.htm>

ZA : Zone Atelier