

Prospective

Institut National des Sciences de l'Univers



Recherches frontières



Surfaces et Interfaces Continentales 2006-2011

Bilan et Prospective 2006-2011 de la Commission spécialisée Surfaces et Interfaces Continentales de l'Institut National des Sciences de l'Univers

Synthèse des ateliers et forums préparatoires et du colloque de Strasbourg 5 - 7 mars 2007

ONT PARTICIPÉ À LA RÉDACTION DE CE DOCUMENT

sous la direction de

Michel Vauclin, président de la CSSIC

Philippe Ackerer, Luc Aquilina, Gilles Bergametti, Gudrun Bornette, Jean-Yves Bottero, Hélène Budzinski, Christian Camerlynck, Sylvie Derenne, Yvan Lagadeuc, Marc Troussellier

Avec la participation de

Hervé Andrieu, Sandrine Anquetin, Cédric Bacher, Thierry Bariac, Pascale Bauda, Jacques Baudry, Gérard Blanchard, Bernard Chastan, Claire Chenu, Marie-France Dignac, Pierre Faure, Nicolas Florsch, Martine Guérif, Jean-Paul Laurent, Sandra Lavorel, Gilles Lemaire, Robert Lensi, Jean-Claude Menaut, Patrick Monfray, Christian Mustin, Philippe Normand, Gilles Pinay, Jérôme Rose, Graciela Schneier-Madanes, Philippe Vandenkoorhuysen

Secrétariat de rédaction

Dominique Armand

Sommaire

| | |
|---|----|
| Éditorial | 06 |
| Résumé des conclusions et recommandations | 08 |

Bilan du programme « ECCO »

| | |
|---|----|
| Prolégomènes | 12 |
| Quelques faits marquants du programme | 13 |
| Quelques résultats spécifiques obtenus dans le cadre du programme | 14 |
| Forces et faiblesses du programme | 18 |

Prospective

| | |
|---|----|
| Prolégomènes | 22 |
| Les flux et les interactions | 24 |
| Les interfaces entre milieux | 34 |
| Nature et impacts des changements globaux | 40 |
| Quelques projets d'actions coordonnées | 42 |
| Observation et expérimentation : méthodes et outils | 45 |
| La modélisation | 58 |
| Deux exemples de valorisation des acquis | 63 |

Annexes

| | |
|--------------------------------------|----|
| Les dispositifs d'observation | 68 |
| Les plates-formes écotroniques | 70 |
| Principaux acronymes | 72 |

Éditorial

Les surfaces continentales et leurs interfaces atmosphériques et marines, qui identifient la division SIC de l'INSU créée en 2002 à l'initiative de Philippe Gillet et André Mariotti, constituent une cible d'études environnementales essentielle pour la compréhension du fonctionnement du « système Terre » et la prévision de son évolution commandée par le changement global. Appréhendées en tant que telles et au travers de caractéristiques propres, liées à leur hétérogénéité fondamentale et aux forçages anthropiques qui s'y exercent davantage que sur toute autre composante terrestre, les SIC ont fait l'objet d'une première prospective nationale conduite en 2002 et concrètement prolongée, en termes d'actions scientifiques, par le programme national multiorganisme ECCO pour « ECosphère Continentale : processus, modélisation et risques environnementaux ».

Focalisée dans un premier temps sur les problématiques du cycle hydrologique et des flux associés, de l'écotoxicologie et l'écodynamique des contaminants et de la dynamique de la biosphère continentale, la première phase du programme ECCO a eu le mérite de fortement structurer la communauté scientifique des SIC et de mettre en exergue certaines lacunes de la réflexion collective, lacunes essentiellement liées au traitement des « questions d'interfaces » au sens large, e.g. terre – air, continental – côtier et biologique – minéral.

C'est donc autour de cette préoccupation, mais aussi avec le souci d'approfondir le questionnement sur les problèmes déjà abordés, que le deuxième exercice de prospective SIC a été entrepris en 2006. Il s'est conclu par le Colloque des 5-7 mars 2007, qui s'est tenu à l'Université Marc Bloch de Strasbourg, et par le présent document de synthèse coordonné par Michel Vauclin.

S'agissant d'environnement, le département EDD du CNRS a été pleinement associé à cette prospective qui n'a cependant que partiellement traité des nombreuses questions environnementales, voire de certains champs thématiques au premier rang desquels se trouve le « Développement Durable ». Un exercice de réflexion complémentaire sur les sciences de l'environnement *sensu lato*, qui est en train d'être conduit par le département EDD, documentera ces aspects.

Partant d'une analyse objective des écosystèmes, de leur fonctionnement et de leur évolution, l'étude des SIC se base généralement sur l'observation à toutes les échelles d'espace et de temps. Dans cette démarche, les services d'observation (SO) mis en place par l'INSU au sein des Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU) ont un rôle essentiel à jouer. La pérennisation des systèmes d'observation est aujourd'hui une nécessité reconnue par toutes les disciplines des sciences de l'environnement et se décline en dispositifs allant de l'acquisition de données de base (« core parameters ») sur le long terme (vocation des SO) à des opérations plus complexes intégrant des problématiques scientifiques (Observatoires de Recherche en Environnement « ORE ») ou des questionnements sociétaux (Zones Ateliers « ZA » portées par le département EDD). C'est la raison pour laquelle une large part est faite dans la réflexion qui suit à la méthodologie, tant analytique qu'observationnelle. À cet égard, la visibilité et la relative accessibilité des surfaces continentales sont des atouts qui ouvrent un champ d'application fertile à la télédétection, largement évoquée durant la prospective.

La mise en évidence des processus physiques, chimiques et biologiques, leur compréhension et leur validation ne sauraient voir le jour sans l'expérimentation qui est sans doute plus facile à mettre en œuvre sur les surfaces terrestres que dans d'autres types de milieux. Le développement de plates-formes d'écologie expérimentale, encore très déficitaire dans notre pays, apparaît aujourd'hui au rang des efforts incontournables à réaliser. La mutualisation de ces infrastructures coûteuses, tout comme celle des équipements analytiques de pointe (e.g., spectrométrie de masse et génomique), a donc aussi fait l'objet de réflexions et de propositions.

La modélisation mécaniste et/ou prédictive (en tant qu'étape ultime de l'aide à la décision) est à l'évidence un thème récurrent de la pensée sur l'étude des milieux naturels. Elle a donc été au cœur des débats engagés pendant la prospective, lesquels ont conduit la communauté à souligner, entre autres priorités, la nécessité de construire, et parfois sauver, des bases de données environnementales validées et librement disponibles, en adéquation avec les missions de l'INSU.

Bien d'autres pistes de réflexion et de suggestions d'actions, ainsi que des priorités de recherche, sont exposées dans ce document. Toutes concernent un domaine d'étude très vaste qui, en dépit de la sectorisation de la démarche, est non compartimenté aux SIC dont certaines problématiques (changement climatique, ressources hydriques, risques naturels) sont indissociables des sections sœurs de l'INSU que sont OA et ST.

Pour aboutir au développement durable, si ce n'est humainement compatible, qui motive *in fine* ces recherches fondamentales, c'est toute la communauté plus large des sciences de l'environnement qui doit s'approprier cette prospective SIC, même si celle-ci est loin d'être exhaustive comme il est dit plus haut.

Très concrètement et sans attendre la parution de cette synthèse, certaines mises en exergue du Colloque de Strasbourg ont été immédiatement traduites au plan opérationnel. Ainsi, l'omniprésence des processus microbiens dans les cycles environnementaux et l'importance des zones littorales et côtières dans les enjeux sociétaux ont justifié le lancement, dès 2007, d'appels d'offres relatifs aux actions thématiques « Microbiologie Environnementale » et « Environnement Côtier » du programme EC2CO dont les fonctions de structuration et de pilotage de la recherche amont sur les surfaces et interfaces continentales ont, sans nul doute et plus que jamais, besoin d'être encouragées et soutenues.

Alain DINET

Directeur Adjoint Scientifique de l'INSU

Résumé des conclusions et recommandations

Ce chapitre résume, pour les cinq années à venir, la synthèse des principaux objectifs scientifiques identifiés lors de la prospective de la communauté des Surfaces et Interfaces Continentales. Il dresse également un inventaire non exhaustif des recommandations relatives aux méthodes, moyens et outils existants ou à développer qu'il conviendra de mettre en œuvre pour répondre aux questions posées et atteindre les objectifs visés.

Les priorités synthétisées ci-dessous ne sont pas classées par ordre d'importance. D'autres propositions plus spécifiques sont déclinées tout au long du document.

■ Objectifs scientifiques

- Décrire, représenter, modéliser les relations structure/fonction à différentes échelles jusqu'à celles des écosystèmes et anthroposystèmes
- Approfondir la connaissance des processus de spéciation, transfert, transformation des multicomposants chimiques (notamment les nanoparticules/nanomatériaux) et des effets toxiques associés
- Évaluer la vulnérabilité des systèmes et de leurs services associés en vue d'élaborer des outils de protection, de restauration, de remédiation et de gestion
- Comprendre et modéliser les échanges de matière et d'énergie aux interfaces des différents compartiments de l'écosphère continentale et côtière

■ Priorités concernant les méthodes

- Développer des approches intégrées (observation, expérimentation, théorie, modélisation) multiparamètres prenant en compte les mécanismes de couplage et d'interactions
- Amplifier l'interdisciplinarité au sein des SIC et la transdisciplinarité avec OA, ST, SC, SdV et SHS

- Adopter aussi souvent que possible des approches comparatives interécosystèmes et entre écorégions les plus sensibles
- Encourager les approches et analyses rétrospectives, notamment pour ce qui concerne la biodiversité, les changements globaux, les crises hydrologiques et environnementales
- Développer des méthodes permettant d'identifier et de représenter l'organisation, la diversité, l'hétérogénéité et la variabilité des surfaces et interfaces continentales
- Contribuer à la mise en place et à la réalisation de campagnes de mesures coopératives abordant un objet d'étude dans sa globalité (e.g. la région méditerranéenne) et/ou dans sa spécificité (e.g. les dépôts et les émissions atmosphériques sur et vers les surfaces continentales et leur devenir dans les écosystèmes)

■ Priorités concernant les outils et moyens

Pour les observations :

- Renforcer les systèmes d'observation et d'expérimentation à long terme, notamment dans les domaines de l'écologie, des systèmes et milieux urbanisés et des interactions homme-milieu

- Développer les concepts de site instrumenté et de plate-forme expérimentale et prévoir les procédures de labellisation correspondantes
- Structurer le dispositif actuel (ORE / SO / ZA / plates-formes expérimentales) en un Service National d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche sur les Surfaces et Interfaces Continentales (OER-SIC) et mettre en place une procédure de reconnaissance interorganisme
- Faciliter l'utilisation des satellites d'observation de la Terre, en complément des mesures *in situ*, et assurer les passerelles avec la communauté ST liée à l'observation terrestre (e.g. hydrogéodésie, risques naturels, mouvements et glissements de terrain)
- Recourir aux méthodes aéroportées/héliportées pour le suivi à long terme de paramètres environnementaux clés
- Favoriser la mutualisation des métadonnées et des bases de données (météorologiques, écologiques, historiques, satellitaires, d'occupation de l'espace, de production agricole, forestière...) qui, si elles existent, ne sont pas toujours bien organisées et inventoriées pour les besoins de la recherche
- Poursuivre la politique d'attribution de postes CNAP et assurer des moyens financiers conséquents dédiés aux Services d'Observation et d'Expérimentations labellisés
- Coordonner et mutualiser certains équipements (e.g. génomique environnementale et plates-formes analytiques)
- Regrouper des compétences, notamment autour de pôles et de plateaux technologiques, pour développer en synergie des capteurs hydrogéophysiques, géochimiques et biologiques, ainsi que les mesures associées, afin de promouvoir les approches couplées expérimentation-modélisation

Pour la modélisation numérique :

- Développer les techniques multiéchelles pour les méthodes de changement d'échelle, d'agrégation, de désagrégation et de régionalisation
- Encourager les études permettant l'intégration de données multiples ayant des supports de mesure très différents ainsi que les méthodes de paramétrisation automatique
- Développer des plates-formes de simulation numérique pluriéchelle permettant la capitalisation de connaissances et facilitant l'intégration de disciplines différentes
- Se doter, au sein de la communauté, des moyens pédagogiques adéquats pour assurer la diffusion des méthodes numériques et des logiciels

Pour l'instrumentation et les capteurs :

- Adapter les capteurs existants, développer des capteurs miniaturisés « intelligents » et encourager les études sur la théorie de la mesure
- Favoriser les expérimentations en milieux contrôlés (laboratoire, micrososme, mésocosme) permettant d'étudier en détail les réponses des écosystèmes à différents forçages et perturbations



Bilan du programme « ECCO »

Prolégomènes

Sur la période 2003-2007, le programme a bénéficié de soutiens financiers pluriannuels importants (de l'ordre de 17 M€ HT en AP, hors salaires) en provenance du ministère de la Recherche (Direction de la Recherche, Département « Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement »), via le Fonds National de la Science, des organismes de recherche (ADEME, Andra, BRGM, CEA, Cemagref, Cirad, CNES, CNRS (Départements Chimie, Sciences de la Vie, Sciences pour l'Ingénieur), Ifremer, INRA, INSU, IRD, LCPC, Météo France) et l'ANR (pour la période s'étendant de 2005 à 2008).

Le programme a soutenu 125 projets de recherche (avec un taux de rejet de l'ordre de 70 %). Il a mobilisé environ 450 ETP chercheurs et enseignants-chercheurs et 150 ETP ITA/IATOS, dont un nombre important de jeunes équipes. La durée moyenne de chaque projet était de 2.5 ans. La production scientifique et technique globale est estimée à 680 publications

dans des revues à comité de lecture, 780 communications à divers congrès et colloques nationaux et internationaux. 230 thèses ont été soutenues ou sont en cours de réalisation.

On trouvera ci-dessous un bilan nécessairement synthétique et non exhaustif de quelques faits et résultats scientifiques marquants obtenus sur la période 2003-2006.

Le lecteur intéressé trouvera sur le site de l'INSU (<http://www.insu.cnrs.fr>) l'ensemble des communications présentées aux colloques de restitution du programme ECCO qui se sont tenus au Centre International des Conférences de la Métropole toulousaine les 5-7 décembre 2005 et 3-5 décembre 2007. Elles ont également été éditées sous forme de CD.

Quelques faits marquants du programme

Le programme a contribué à l'émergence et/ou la consolidation d'actions d'envergure destinées à structurer les communautés scientifiques autour de problématiques prioritaires telles que :

- le réseau « Transferts complexes en milieu poreux et ressources en eau » (15 équipes) dont l'objectif est le développement d'approches physiques et mécanistes intégrant les changements d'échelle nécessaires à la compréhension de l'hydrodynamique et l'hydrochimie des réservoirs souterrains (PNRH), qui a évolué vers le GDR « Hydrodynamique et Transferts dans les Hydrosystèmes Souterrains » ;
- le réseau « RIDES » pour l'étude du Ruissellement, de l'Infiltration, de la Dynamique des États de Surface du sol et du transfert des sédiments à différentes échelles spatiales et temporelles et dans différents contextes géologiques, pédologiques, hydrologiques et édaphiques (16 équipes) (PNRH) ;
- le réseau « WATERSCAN » dévolu au développement de méthodes géophysiques « non destructives » pour la caractérisation des circulations hydriques en proche surface et dans le sous-sol et pour la modélisation hydrogéophysique 4D (10 équipes) (PNRH) ;
- la constitution d'un réseau multisite dédié à « l'hydrogéodésie » pour mieux comprendre et modéliser les déterminismes liant les phénomènes hydrologiques aux observables géodésiques (15 équipes) (PNRH) ;
- la constitution d'un groupe d'étude « Dylachem », dédié à la dynamique physique et aux hétérogénéités biogéochimiques d'un lac alpin (10 équipes) (PNBC, PNRH) ;
- le « Réseau Français de Virologie Aquatique : de la Génomique à l'Écologie » (RAVAGE) destiné à l'étude de la dynamique des virus dans le fonctionnement des réseaux trophiques lacustres (13 équipes) (PNBC) ;

- le consortium « GEOTRAITS » dont la vocation est l'étude des relations entre traits des espèces végétales et fonctionnelles des écosystèmes (5 équipes principales + 20 associées) (PNBC) ;

- l'initiation de la plate-forme communautaire « SEVE » de modélisation du fonctionnement des surfaces continentales aux échelles locales et régionales du système Sol – Eau – Végétation – Énergie (13 équipes) (PNRH, PNBC).

Le programme a joué également un rôle important dans l'impulsion qui a été donnée aux Systèmes d'Observation (voir en annexe), en regroupant les compétences de chercheurs de disciplines variées (météorologie, hydrologie, géophysique, géographie, mathématiques appliquées, socio-économie...) autour d'objets communs, avec pour objectifs :

- une standardisation aussi poussée que possible des observations, des méthodes de mesure, des stratégies d'échantillonnage et de la constitution des bases de données ;
- le développement et le test de nouveaux capteurs et traceurs environnementaux ;
- une meilleure synergie dans le triptyque observations – théories – modèles ;
- la valorisation de données communes par la modélisation et l'échange de codes numériques ;
- et une mise en commun des savoir-faire dans l'étude et la gestion des sites.

Quelques résultats spécifiques obtenus dans le cadre du programme

Parmi l'ensemble des nombreux projets qui ont eu ou auront à terme des retombées sur la communauté dans les domaines de la compréhension des processus et de leur couplage à différentes échelles, nous citerons de façon non exhaustive :

- la spéciation moléculaire : une approche indispensable pour comprendre la dynamique d'éléments traces (Cu, Zn, Hg) à l'interface sol – matière organique – plante ;
- la mise en évidence des mécanismes de tolérance et d'accumulation par les plantes hyperaccumulatrices (exemple de l'*Arabidopsis halleri* pour le Zn et le Cd) et de l'influence de l'espèce végétale dans la phytoextraction du Ni en fonction de son statut dans les phases minérales porteuses ;
- la complémentarité des approches chimiques et biologiques pour préciser les notions de biodisponibilité et de descripteurs d'impacts en relation avec les matières organiques du sol et la spéciation du cuivre ;
- l'importance des matières organiques dissoutes et des fractions colloïdales dans le transfert et la biodisponibilité des métaux et des HAP dans les sols, les cours d'eau, les zones rivulaires et les eaux urbaines ;
- l'identification des mécanismes couplés chimie/microbiologie pour l'atténuation d'une pollution en arsenic issue du drainage de déchets miniers acides ;
- les apports de l'hydrogéochemie et des analogues archéologiques pour estimer les impacts environnementaux des activités minières et métallurgiques anciennes ;
- les impacts sanitaires et radiologiques du sélénium étudiés par une approche géochimique et microbiologique couplée ;
- la revisitation de la biogéochimie du Hg dans les sédiments côtiers par enrichissement d'espèces isotopiquement stables ;
- l'utilisation couplée de biomarqueurs microbiens et de traceurs isotopiques qui a montré l'importance du compartiment « biomasse microbienne » dans les processus de stabilisation des pesticides dans les sols ;
- l'association d'études *in situ* et en mésocosmes pour la mise en évidence de l'effet prépondérant des phytosanitaires dans la dynamique des communautés périphytiques le long d'un gradient amont-aval de contamination ;
- une approche pluridisciplinaire (chimie, écotoxicologie, génie des procédés) pour une meilleure compréhension de l'influence des types de matières organiques dissoutes sur la biodisponibilité de micropolluants toxiques (Cu, Cd, HAP) dans des eaux urbaines fortement anthropisées ;
- les particules exopolymériques transparentes : un vecteur privilégié du transport des contaminations métalliques à travers le réseau trophique du lagon de Nouvelle-Calédonie ;
- une évaluation de la toxicité et de l'effet perturbateur endocrinien sur différents organismes aquatiques (invertébrés et vertébrés) qui a montré le caractère persistant des œstrogènes dans les effluents urbains, notamment chez le poisson en phase de puberté ;
- la mise en évidence des relations exposition – accumulation – réponses biologiques chez les bivalves et les mousses aquatiques, par une étude intégrée de l'écodynamique des pollutions métalliques et organiques ;
- une étude des impacts des variables environnementales sur le contrôle et les effets toxiques des microcystines aquatiques, conduite sur un modèle intégrateur cible, le poisson médaka ;
- le couplage physicochimique, cytotoxicologique et génotoxicologique des interactions nanoparticules manufacturées – cellules cibles qui a montré, par traçage au ^{13}C et analyse IRMS, la possible occurrence d'une mobilité potentielle des nC60 (suspension de nanoagrégats de fullerènes) dans l'environnement ;

- une étude expérimentale de l'influence des invertébrés (vers et larves) sur la réduction par colmatage de la perméabilité des sédiments urbains et sur la dégradation de la matière organique qui a permis de quantifier le rôle de la bioturbation aux interfaces eau – sédiments ;
- l'intérêt du couplage entre la nature, les réactivités biogéochimiques et les transferts, pour établir une typologie fonctionnelle des matières organiques solubles dans les sols ;
- une revisitation des critères de choix des rivières eutrophisées et acidifiées au regard des processus de décomposition de la matière organique, les concentrations en ammonium, nitrites et matières en suspension apparaissant plus pertinentes ;
- l'influence du brûlis, de la mise en culture et de l'érosion hydrique sur les sols tropicaux cultivés à fortes pentes : la quantification de l'érosion du carbone et la contribution du charbon conduiraient à réduire les possibilités de séquestration du carbone et à constituer un puits dans les sédiments continentaux et marins naturels ou artificiels (retenues de barrages) ;
- la protection des matières organiques : les résultats sur la lignine montrent que la récalcitrance chimique ne semble pas être le processus dominant de préservation des molécules végétales et de leur carbone constitutif dans les sols ;
- l'étude de l'impact des régimes hydrologiques et des modes d'utilisation des terres sur les processus microbiens (respiration, dénitrification, nitrification) à l'origine des GES ;
- l'identification des processus biogéochimiques contrôlant les émissions de CO₂, CH₄, N₂O et le cycle du carbone en milieu tropical (le barrage de Petit Saut en Guyane Française) (en liaison avec le PNCA) ;
- l'étude expérimentale et la modélisation des échanges d'ozone entre la végétation (plantes C₃ et C₄) et l'atmosphère et l'évaluation des impacts résultants sur la qualité de l'air, la production de biomasse et le rendement agricole (en liaison avec le PNCA) ;
- la mise en évidence d'une oxydation anaérobie du méthane dans le lac Pavin par un mécanisme impliquant la participation des bactéries ferro-réductrices ;
- la réduction des incertitudes sur les estimations des bilans d'eau et de carbone, par l'introduction de nouveaux processus (e.g. cycle de l'azote, prise en compte des cultures et des prairies, photosynthèse et paramétrisation multicouche de l'hydrologie des sols) dans le modèle ORCHIDEE ;
- la cellulose : un bon modèle pour étudier le couplage entre les cycles biogéochimiques du carbone et de l'azote ainsi que pour caractériser les groupes fonctionnels microbiens et leur dégradation ;
- la remise en suspension du microphytobenthos en milieu littoral : un paradoxe apparent et une source de carbone pour la zone pélagique côtière ;
- la réalisation d'une analyse exhaustive des relations entre traits de réponse et traits d'effet des espèces végétales et le fonctionnement des écosystèmes, pour un large spectre de conditions écologiques, géographiques, historiques et de systèmes agraires ;
- l'influence du changement d'utilisation des terres sur l'architecture d'un réseau trophique (proies – prédateurs) : la buse et faucon crécerelle constituent des indicateurs écologiques pertinents pour détecter les changements contextuels de l'agriculture aux échelles régionales et microrégionales ;
- l'étude des potentialités de régénération de l'écosystème « tourbière » par le suivi de marqueurs isotopiques (¹³C, ¹⁵N, ³⁴S) ;
- l'étude de la sensibilité et de la résilience des feux de forêt au fonctionnement et à la diversité d'un écosystème subalpin ;
- la mise en évidence d'une dépendance possible de la stabilité du carbone organique dans les sols profonds avec la pénurie énergétique de carbone frais pour soutenir des populations microbiennes ;
- l'influence du rôle majeur joué par la turbidité des écosystèmes fluviaux dans la dynamique des biofilms ;
- le suivi de la dynamique spatio-temporelle du bois mort dans les cours d'eau par l'analyse géochimique, afin de proposer des solutions nouvelles et adaptées en termes d'entretien et de gestion des risques ;

Quelques résultats spécifiques obtenus dans le cadre du programme

- la caractérisation phénoménologique des processus d'attachement et de détachement de cellules bactériennes en fonction de variables telles que l'ambiance chimique (force ionique), l'écoulement hydrodynamique et les propriétés de surface des bactéries (hydrophobicité, mobilité électrophorétique) ;
- la réalisation d'une caractérisation des communautés bactériennes dénitrifiantes et de la spatialisation des émissions de N_2O à l'échelle du bassin de la Seine ;
- la modélisation hydrodynamique et biogéochimique des échanges continent – océan (bas-delta du Sénégal) pour étudier la réponse des communautés phytoplanctoniques aux forçages de salinité et de nutriments ;
- la pertinence du couplage des processus hydrologiques et biogéochimiques pour mieux comprendre l'origine, le devenir et les temps de transfert des solutés à l'interface sol insaturé – nappe libre ;
- l'importance de la nécessité de prendre en compte la zone non saturée dans la genèse des remontées d'une nappe et des éventuelles inondations par une approche multi modèles appliquée au bassin de la Somme ;
- la meilleure compréhension de la structure 3D d'un bassin versant granitique fissuré grâce à une approche pluridisciplinaire associant la géologie, la géophysique, l'hydrogéochimie et le traçage isotopique ;
- la paramétrisation de modèles partiellement homogénéisés pour la représentation de l'hydrodynamique des milieux poreux fracturés, à l'échelle du réservoir ;
- les effets de l'hétérogénéité des milieux poreux sur la dispersion passive et la dispersion active (dissolution en surface de micelles peu miscibles) dans le cas des solvants chlorés ;
- le couplage de méthodes euléro-lagrangiennes avec des approches de substitution directe ou séquentielle non itérative, pour la modélisation du transport réactif dans les milieux poreux saturés ;
- l'application de la loi de Fick fractionnelle et des équations différentielles qui en découlent, pour décrire et modéliser le transport des solutés dans des sols fortement hétérogènes, non saturés ;
- la mise en évidence d'une relation non linéaire entre flux d'eau et polarisation spontanée en milieu non saturé, contrairement au cas du milieu saturé ;
- l'extension du modèle SiSPAT aux surfaces revêtues (urbaines et routières) et l'évaluation d'une modélisation hydrologique distribuée adaptée aux bassins versants urbanisés ;
- l'établissement d'une typologie des régimes fluviaux et torrentiels dans les réseaux d'assainissement souterrains par des approches expérimentales et de simulations numériques mettant en évidence le rôle clé joué par les intersections dans la diffusion des inondations ;
- la mise en œuvre de la modélisation couplée des transferts de masse, d'énergie et des isotopes stables de l'eau, en vue d'étudier la partition entre l'évaporation et la transpiration des couverts végétaux ;
- l'utilisation de données satellitaires qui a permis de prouver l'existence, longtemps controversée, d'un Mégalac au Tchad, constituant désormais l'exemple le plus frappant des fluctuations hydrologiques de grande ampleur ayant affecté l'Afrique tropicale au cours de l'Holocène ;
- l'utilisation conjointe, et pour la première fois, de données altimétriques radar, d'une modélisation hydrodynamique et d'une cartographie de l'extension spatiale de l'inondation pour une meilleure compréhension de la dynamique de la crue du bassin amazonien du Rio Negro ;
- l'évaluation de l'impact de l'humidité des sols sur la localisation et l'intensité des systèmes convectifs fortement développés et sur la répartition spatio-temporelle des pluies dans le cas d'une convection peu profonde ;
- l'estimation par désagrégation des principales caractéristiques du climat régional à partir d'une connaissance correcte de la circulation atmosphérique ;

- les approches multiéchelles et pluriannuelles de la variabilité du fonctionnement des hydrosystèmes et des éco-agrosystèmes d'Afrique de l'Ouest (Bénin, Mali, Niger) ;
- la mise en place du couplage atmosphère – hydrosphère pour la compréhension, la modélisation et la prévision des phénomènes de crues rapides (en liaison avec le PATOM).

Concernant les aspects méthodologiques et métrologiques, on peut citer :

- l'intérêt d'avoir recours à la construction de puces ADN dédiées à la mesure multi-marqueurs de l'impact des xénobiotiques pour la surveillance des milieux littoraux ;
- le développement de techniques cytométriques et microscopiques pour la composition et le dénombrement des virus en milieu lacustre et pour l'estimation des activités virales lytiques et lysogéniques ;
- la mise en évidence de la diversité microbienne des milieux lacustres par une approche métagénomique ;
- les approfondissements méthodologiques des complexes organo-minéraux pour l'étude de la dynamique du carbone dans les sols tropicaux volcaniques et de la protection physicochimique des matières organiques solubles ;
- l'intérêt des méthodes multiéchelles pour l'étude des phénomènes hydrométéorologiques extrêmes et de l'analyse bayésienne pour l'identification des tendances et des ruptures des extrêmes hydrométriques français (crues et étiages) dans un contexte de non stationnarité ;
- la construction d'une méthode de régionalisation des modèles de circulation générale utilisable pour les études d'impacts hydrologiques avec validation sur le temps présent et application à des scénarii climatiques futurs ;
- les développements d'outils d'intelligence artificielle intégralement dédiés à la tâche de calage de modèles numériques ;
- les apports du radar météorologique bande X couplé à des disdromètres optiques pour les études microphysiques des précipitations et de l'identification des cellules convectives ;
- le développement de la mesure d'humidité troposphérique par GPS pour l'étude des crues-éclair (en liaison avec le PATOM) ;
- la pertinence de l'inclinométrie hydrostatique pour déterminer les variations des masses d'eau ;
- l'évaluation du potentiel et des limites de la photogrammétrie haute résolution pour l'étude de la dynamique des systèmes fluviaux ;
- la mise au point d'un prototype de sondage électromagnétique aux fréquences intermédiaires (100 kHz - 10 Mhz), encore peu étudié en géophysique mais très prometteur pour la mesure simultanée de l'humidité du sol et de la salinité ;
- la reconstitution 3D de la distribution de la teneur en eau des aquifères fracturés par la méthode de Résonance Magnétique Protonique ;
- le développement d'un radiomètre de terrain permettant des observations rapprochées des teneurs en eau du sol, aux échelles métriques à décimétriques avec des résolutions allant du m² à quelques centaines de m² ;
- la mise au point d'une méthode ultrasonore de mesure du profil de concentration sédimentaire adaptée aux mélanges fortement concentrés ;
- le développement d'un radiomètre de terrain permettant des observations rapprochées des teneurs en eau du sol, aux échelles métriques à décimétriques et avec des résolutions allant du m² à quelques centaines de m².

Forces et faiblesses du programme

Au chapitre des points forts, le programme ECCO a su, dès sa phase de démarrage, mobiliser dans ses trois Actions Thématiques un nombre très important d'équipes et de chercheurs de différents organismes et instituts. Ce qui prouve que les thèmes scientifiques proposés et développés correspondaient à un réel besoin de la communauté travaillant sur les problématiques environnementales des Surfaces et Interfaces Continentales.

Il est permis de penser qu'ECCO a ainsi largement contribué à doter la communauté française d'une recherche environnementale de qualité, essentiellement centrée sur les échelles locales et régionales, mais capable également d'un dialogue équilibré avec la recherche menée à l'échelle globale, équilibre qu'il convient néanmoins de conforter et d'amplifier au cours des prochaines années.

Le programme a facilité le développement de réseaux de laboratoires et la constitution de « chantiers » en France métropolitaine et ultramarine ainsi qu'à l'étranger, qui ont permis d'une part une mise en commun de moyens expérimentaux, analytiques et d'observation, de bases de données, de modèles et de logiciels, et d'autre part la conduite d'actions plus spécifiquement dédiées à des problématiques scientifiques, méthodologiques ou météorologiques complémentaires.

Les soutiens initiaux de type « incitatif » et le label apportés par ECCO ont également permis à un nombre significatif d'équipes de valoriser les résultats de leurs travaux par l'acceptation ultérieure de projets financièrement soutenus aux niveaux régional (CPER), national (ANR) et européen.

En revanche, certaines faiblesses sont apparues :

- un cloisonnement encore important entre les disciplines (physique, chimie, biochimie, biologie moléculaire, écotoxicologie...) et entre les milieux continentaux ou marins côtiers (sol, eau, sédiments...);
- une intégration insuffisante entre l'expérimentation et la modélisation et une carence relative en modélisation intégrée;
- des difficultés rencontrées par de nombreuses équipes pour aborder les milieux complexes dans l'interdisciplinarité;
- un éclatement du dispositif des Systèmes d'observation les rendant insuffisamment visibles au plan international;
- une mutualisation de moyens, notamment dans les domaines analytiques, de gestion et d'archivage des bases de données, largement perfectible.



Prospective

Prolégomènes

Les recherches dans le domaine des Surfaces et Interfaces Continentales s'articulent autour de questionnements scientifiques majeurs qui concernent de plus en plus les différentes parties prenantes de la société. C'est par exemple le cas des aspects ressource (hydrologie) ou milieu de vie (écologie aquatique) régis par la Directive Cadre Européenne. Celle-ci impose en effet aux États membres d'atteindre « un bon état écologique des masses d'eau » à l'horizon de 2015 et implique un cadre pour l'action publique qui peut être contraignant, comme on l'a vu récemment avec la condamnation de la France pour la non application de la Directive nitrates en Bretagne.

Le changement climatique constitue un second exemple. Il est frappant de constater qu'en quelques années, la réflexion s'est étendue du champ scientifique vers celui de la sphère politique, les rapports successifs du GIEC jouant un rôle majeur et moteur dans cette évolution.

Les contaminations chimiques et biologiques des écosystèmes, et par voie de conséquence celles concernant la santé animale et humaine, l'impact des modalités de changement d'utilisation des terres et la dégradation de la qualité des sols qui en résulte, la perte de biodiversité et ses conséquences en termes de ressources et de fonctionnement des écosystèmes sont également en prise directe avec de nombreuses préoccupations sociétales de plus en plus prégnantes. Il en est de même des questions relevant des aléas naturels, des risques et de leur anticipation et mitigation, de la vulnérabilité des systèmes physiques, biologiques et sociaux, et de leur résilience et capacité d'adaptation aux différentes perturbations.

Toutes ces questions font partie du « paysage » médiatique et constituent autant de sollicitations « amont » vis-à-vis desquelles les recherches fondamentales doivent se situer et apporter des réponses scientifiquement fondées.

Il est maintenant acquis qu'une meilleure compréhension de la structure et du fonctionnement des écosystèmes et de la dynamique d'évolution des surfaces et interfaces continentales, qui sont par essence hétérogènes, complexes, non linéaires et « socialement marquées », requiert une approche intégrée pluridisciplinaire de type « systémique » impliquant :

- d'améliorer et de consolider la représentation et la modélisation des phénomènes élémentaires intervenant dans les dynamiques de l'hydrosphère, de la pédosphère ou de la biosphère, et ce, à différentes échelles spatio-temporelles ;
- de renforcer les connaissances relatives d'une part aux couplages entre les processus physiques, chimiques et biologiques agissant au sein d'un même compartiment et d'autre part à leurs conséquences en termes de flux et de bilans entre les différents réservoirs ;
- de réunir en une préoccupation scientifique unique l'étude et le fonctionnement des interfaces entre les différents objets constituant les surfaces et interfaces continentales, aussi bien terrestres (couche limite atmosphérique de surface, végétation, sol, sous-sol) que littorales et côtières ;
- de recourir à un large panel de méthodes et d'outils allant de la caractérisation des objets d'étude à leur modélisation multiéchelle, en passant par l'observation et l'expérimentation *in situ* ainsi que par la « manipulation » des facteurs environnementaux et des pressions anthropiques aux échelles fines ;
- de favoriser le décloisonnement disciplinaire entre les sciences biogéophysiques elles-mêmes et avec les sciences humaines et sociales.

Face à ces enjeux, trois axes de réflexion prospective ont été dégagés :

- Les flux et les interactions physiques, chimiques et biologiques au sein des différents compartiments constituant les surfaces continentales
- Les interfaces entre les milieux terrestres (air, végétation, sol, sous-sol) et littoraux - côtiers
- La nature et les impacts des changements globaux sur les écosystèmes terrestres et aquatiques

Ils ont été croisés avec :

- Une approche par « thèmes de recherche » tels que le rôle joué par la biodiversité ou les matières organiques sur le fonctionnement des écosystèmes
- Une approche par « disciplines », celles nécessaires pour aborder les questions relatives à l'hydrologie, l'écologie, l'écotoxicologie et l'écodynamique des contaminants, la géochimie, la géophysique, la génomique, la télédétection et la modélisation
- Les méthodes et outils correspondants qu'il conviendrait de développer et/ou de mettre en œuvre

Plusieurs projets pluridisciplinaires et intégrés visant à initier ou à développer des travaux focalisés sur quelques-unes des actions prioritaires énoncées ci-dessus sont proposés. Ils portent notamment sur le bassin méditerranéen, les systèmes et milieux urbanisés et l'Afrique de l'Ouest.

Enfin, l'ingénierie écologique et la remédiation des milieux contaminés sont présentées comme deux exemples de travaux (parmi d'autres) situés au carrefour entre des recherches cognitives et des recherches finalisées, ce qui constitue également l'une des missions de la communauté.

Les flux et les interactions

Concernant les thèmes relatifs à l'eau, aux matières organiques, aux contaminants des écosystèmes et à la biodiversité, la prospective a mis en avant les priorités de recherche suivantes, qu'il conviendra de développer pour une meilleure compréhension et représentation des flux et interactions au sein des milieux continentaux.

■ L'eau et les flux associés

• Le contexte des recherches

L'eau est un élément qui joue un rôle majeur dans les différents compartiments constituant les surfaces et interfaces continentales (pédosphère, hydrosphère, biosphère, et leurs interfaces avec l'atmosphère et le milieu marin côtier) en tant que :

- support d'un grand nombre de systèmes biologiques et écologiques ;
- vecteur de matières dissoutes ou en suspension, naturelles ou d'origine anthropique ;
- milieu de nutrition par la dissolution de minéraux permettant l'apport d'éléments nutritifs aux plantes ;
- agent d'érosion mécanique et d'altération biogéochimique, notamment des sols ;
- moyen de transport, de stockage et de dissipation d'énergie.

Bien que présente dans 70 à 90 % des systèmes biologiques, cette eau devient une « denrée » rare. En effet, depuis quelques décennies, les demandes en eau pour l'environnement tendent à rejoindre globalement, et même à dépasser localement, les quantités disponibles. De plus, les activités humaines conduisent souvent, et de plus en plus, à une dégradation de la qualité des eaux, des sols et des écosystèmes. Ces deux phénomènes se combinent et font des ressources en eau un enjeu environnemental majeur pour les systèmes naturels et les sociétés humaines. C'est pourquoi il est indispensable de développer une gestion intégrée de l'écosphère continentale tenant compte à la fois des ressources et des demandes d'une part, et des interactions physiques, environnementales

et sociétales d'autre part, et ce, à travers les différents flux associés d'eau, d'énergie, d'éléments chimiques et de matières particulaires biotiques et abiotiques. Ce mode de gestion doit pouvoir s'appuyer sur des outils de représentation et d'évaluation des flux, des stocks et des bilans, ce qui nécessite une compréhension aussi exhaustive que possible des processus à différentes échelles spatio-temporelles :

- l'échelle locale et régionale, là où se manifestent de fortes pressions anthropiques pouvant être en conflit avec les contraintes écologiques de bon fonctionnement et de durabilité des milieux concernés ;
- l'échelle nationale et européenne, avec la mise en place de Directives (e.g. celles relatives à l'eau, aux nitrates, aux déchets et bientôt aux sols) et de politiques communautaires (e.g. la PAC, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et l'initiative REACH) qui s'imposent à tous les États membres, alors que de nombreuses lacunes en termes de connaissances et de modes adéquats de représentation demeurent concernant le fonctionnement des surfaces et interfaces continentales ;
- l'échelle de la planète, avec la préoccupation croissante en matière de développement durable et comme corollaire la prise de conscience de la nécessité, au plan scientifique, de prendre en compte les couplages entre les compartiments et les processus (hydrologie ⊗ chimie ⊗ biologie ⊗ écologie) ainsi que les interactions homme ⊗ milieux ;
- les échelles temporelles, pour lesquelles les phénomènes à temps court sont encore insuffisamment bien compris et donc mal modélisés ; à plus long terme, l'effet des changements globaux, climatiques et anthropiques, sur les grands cycles biogéochimiques et sur le fonctionnement et l'évolution des sols reste mal connu et les conséquences incertaines ; de plus, cet impact ne doit pas se limiter à l'évaluation des tendances aux temps longs, mais

aussi intégrer l'évolution des phénomènes extrêmes (précipitations intenses, crues, inondations, glissements de terrain, sécheresses...) et les rétroactions des surfaces sur le changement climatique lui-même.

Compte tenu de ces enjeux sociétaux qui deviendront de plus en plus prégnants, d'importants soutiens à des recherches exploratoires dédiées à l'hydrologie quantitative et qualitative et à l'écologie aquatique *sens lato*, sous conditions naturelles et/ou influences anthropiques, restent indispensables, malgré les avancées de ces dernières années.

• Les priorités et les moyens à mettre en œuvre

Coupler les cycles hydrologiques et biogéochimiques

L'approche intégrée de ces cycles constitue un enjeu essentiel pour l'avenir. Elle se justifie non seulement par les problèmes de qualité des eaux et des sols, mais aussi par le développement de méthodes de traçage par l'expérimentation et/ou l'observation *in situ* qui sont considérées comme l'une des principales voies actuelles (et futures) de progrès dans la compréhension des mécanismes hydrologiques pour déterminer et modéliser l'origine des écoulements, les voies de transfert et les temps de résidence. Une attention particulière devra également être portée sur l'explicitation des processus biologiques, chimiques et physiques hors équilibre et sur la prise en compte de l'hétérogénéité du milieu, en termes d'écoulement et de réactivités chimiques et biologiques, dans l'analyse et la modélisation de la qualité des eaux. Toutefois, la modélisation devra rester équilibrée dans ses hypothèses entre les mécanismes hydrologiques et biogéochimiques, tout en minimisant les pertes d'informations lors des changements d'échelle.

Les matières organiques ayant une forte influence sur le maintien de la structure des sols ainsi que sur leur capacité de rétention en eau, la meilleure connaissance possible de leur état et de leur devenir permettra également de mieux appréhender le cycle hydrologique.

Prêter un intérêt particulier à l'impact de l'accumulation et du transfert des toxiques organiques et inorganiques, ainsi que des agents pathogènes, sur la qualité des sols, des eaux et des écosystèmes

Dans un premier temps, il s'agit d'établir, pour les différents toxiques et agents biologiques, les principales voies contribuant à la contamination des milieux (e.g. pratiques agricoles, retombées atmosphériques, recyclage des déchets et pollutions industrielles). Dans un deuxième temps, il convient de déterminer leur devenir dans les différents milieux (e.g. spéciation, réactivité, transformations, transferts de gènes et antibiorésistance), afin d'évaluer leur transfert vers les ressources en eaux et les chaînes trophiques. Cet aspect inclut notamment la modélisation physique et biogéochimique de leurs comportements dans l'environnement. Les résultats devront déboucher sur la quantification d'impacts, en termes de qualité des milieux et de biodiversités structurelle et fonctionnelle, notamment dans les sols et les eaux. Cela suppose de renforcer les couplages avec la biologie et l'écologie des sols et des milieux aquatiques et les risques toxicologiques sur la faune et la flore, voire la chaîne alimentaire.

L'analyse des risques liés aux toxiques organiques et aux agents biologiques implique le développement de méthodes prenant en compte les métabolites issus des molécules mères ainsi que la spécificité des pathogènes (e.g. dose infectante et caractère contagieux).

Évaluer les risques hydrologiques et géomorphologiques par une meilleure connaissance des aléas

Les éléments de contexte sont ici particulièrement importants car ils « pilotent » la demande en recherche. En effet, même si la tendance générale de la « demande sociétale » est de plus en plus tournée vers des capacités de prévision (et pas simplement de prédiction) des phénomènes naturels, l'offre de prévision en temps réel est initiée, soutenue et portée par les Services Opérationnels qui y sont dédiés. Prévoir une crue en temps réel par exemple nécessite une anticipation à plusieurs niveaux pour laquelle tous les outils sont encore loin d'être disponibles « sur étagère » pour l'ingénierie, malgré les progrès constants dans ce domaine. De plus, rien n'indique que les modèles usuels étalonnés et « validés » en situations dites « normales » gardent toute leur pertinence en situations extrêmes. En effet, les hypothèses émises pour la hiérarchisation des processus, les changements d'échelles et la linéarisation des phénomènes peuvent être invalidés

lorsque les échelles de temps sont très courtes et/ou que les forçages atmosphériques ainsi que les conditions initiales et aux limites (état hydrique des sols, niveau des nappes...) sont très différents.

Concernant les aléas, il est suggéré de mettre l'accent sur les aspects (non exhaustifs) suivants :

- l'étude des extrêmes pluviométriques et l'identification des non stationnarités, la mise en évidence expérimentale du changement climatique faisant toujours débat ;
- l'utilisation conjointe des données radar et de la modélisation hydrologique à bases physiques et spatialement distribuée ;
- le développement de la modélisation couplée « two-way approach » entre l'atmosphère et la surface (hydrologie et biosphère) ;
- l'assimilation de données, méthode insuffisamment développée et utilisée pour ce qui concerne le domaine des surfaces continentales ;
- le transport de matière et la dynamique fluviale dans le continuum bassins versants – réseaux hydrographiques réunis en une préoccupation unique, l'étude des bassins hydrographiques non jaugés (la grande majorité des cas) pouvant constituer une priorité, en liaison avec l'initiative internationale PUB (Prediction of Ungauged Basin) qui requiert une revisitation drastique des approches conceptuelles de la modélisation.

Pour ces différents aspects, il conviendrait de soutenir quelques opérations « pilotes » associant aussi étroitement que possible atmosphériciens et hydrologues et ce, dans leurs composantes « recherche » et « finalisée ». À cet égard, les projets tels que MEDUP (Forecast and projection in climate scenarii of Mediterranean intense events: Uncertainties and Propagation on environment), HyMeX (Hydrological cycle in the Mediterranean eXperiment) et plus largement ceux portant sur le bassin méditerranéen devraient pouvoir constituer des opportunités au cours des toutes prochaines années.

Concernant les risques et par extension la dimension sociale de l'eau, les degrés de vulnérabilité et d'exposition varient considérablement selon les niveaux de développement des sociétés. Un des enjeux est en effet celui de la prévision et de la prévention des phénomènes extrêmes, donc rares, et de l'anticipation et de la prise en compte de l'aléa dans la gestion territoriale. La succession de phénomènes extrêmes (crues, inondations, sécheresses, incendies, pollutions accidentelles aigues, efflorescences algales, crises dystrophiques) pose

également la question de la résilience des systèmes complexes : comment appréhender la capacité des couples « eaux – territoires » à retrouver un état d'équilibre après perturbation ou à évoluer vers un nouvel état d'équilibre ?

Alors que de nombreuses équipes des sciences humaines et sociales sont actives sur les problèmes relatifs à l'eau et à sa gouvernance, il convient de renforcer la structuration des collaborations avec les communautés des sciences de la nature sur des thèmes tels que l'exploitation et la gestion des ressources en eau non conventionnelles, les risques hydrauliques et la gouvernance ou l'étude de la conscience écologique des populations concernées par la transformation des milieux. Cela passe par la co-construction de corpus de connaissances, incluant une dimension historique et une méthodologie de retour d'expérience, et la mise en commun d'objets d'étude, l'échelle des territoires (interface terre – mer, milieux urbains et périurbains, zones semi-arides et arides) pouvant être privilégiée.

Prévoir les temps et modalités de réponse des hydrosystèmes aux perturbations et aux changements de structure et d'usage

Les hydrosystèmes sont par nature hétérogènes et le lieu d'actions et de rétroactions fortement non linéaires et pas toujours réversibles. Leurs réponses aux variations des forçages et aux modifications du milieu, et les temps caractéristiques qui leur sont associés, sont donc très difficiles à prévoir. De plus, les interactions entre phénomènes à temps courts et perturbations des forçages à long terme posent le problème de leur hiérarchisation.

Il faut se donner les moyens d'identifier et de modéliser les contributions localisées dans l'espace et le temps et relatives aux effets à court terme de l'utilisation des terres, en liaison avec le changement climatique à plus long terme, ou encore les contributions de l'impact, sur la qualité des eaux et des sols, des variations à long terme du climat par rapport à celles dues aux phénomènes à court terme en relation par exemple avec les processus microbiologiques ou les modes d'intrants agricoles.

Enfin, les impacts globaux d'un ensemble de microperturbations locales et chroniques sur les hydrosystèmes, comme les effets thermiques et les pollutions d'origine chimique et biologique à faible dose (produits phytopharmaceutiques...), sont encore trop peu étudiés pour pouvoir détecter et prévoir les effets à long terme de ce type de perturbations.

■ Les matières organiques naturelles

• Le contexte des recherches

Les matières organiques sont omniprésentes dans les surfaces continentales (sols, sédiments et eaux). En particulier, la matière organique des sols constitue un des principaux réservoirs de carbone sur Terre. La majorité de la matière organique contenue dans la biosphère continentale est soumise à d'importants facteurs biologiques hautement réactifs aux variations naturelles et anthropiques de l'environnement. Il est essentiel de déterminer les mécanismes qui interviennent dans la préservation ou la dégradation de la matière organique dans les écosystèmes. En particulier, on peut se poser la question du rôle de l'eutrophisation dans sa préservation. Dans le contexte de changements globaux, les régions tropicales et celles de hautes latitudes représentent des sites d'étude de choix, les premières en particulier en relation avec la déforestation et les secondes car elles présentent de grandes surfaces exposées à l'érosion et que leurs sols sous pergélisol sont particulièrement riches en carbone. Le réchauffement climatique doit induire une remobilisation de la matière organique et en particulier du carbone, entre autres par l'augmentation de l'activité microbienne.

La matière organique contribue à fournir un environnement favorable au développement des microorganismes dans les sols et les eaux comme sources de nutriments, par sa capacité de rétention de l'eau, par son impact sur la structure du sol au travers de la formation de complexes organo-minéraux. De plus, elle est à la base des réseaux trophiques détritiques, mais cet aspect est insuffisamment pris en compte. On peut toutefois concevoir que, selon la nature des différentes communautés présentes, la vitesse d'accumulation de la matière organique va varier et donc sa durée de vie aussi. Par ses interactions avec les polluants, elle joue également un rôle important dans leur mobilité, toxicité et biodisponibilité.

• Les priorités et les moyens à mettre en œuvre

Mieux connaître la structure et la composition chimique des matières organiques

Il est prévisible que selon sa structure, la matière organique soit plus ou moins dégradable. Il est donc essentiel de mieux connaître sa composition chimique pour affiner les modèles de fonctionnement des cycles biogéochimiques, en particulier celui du carbone. Si les molécules de faibles poids moléculaires sont les mieux connues, la structure chimique de la fraction macromoléculaire reste encore à élucider. Les outils analytiques disponibles permettent d'accéder soit à la nature des fonctions présentes par des méthodes spectroscopiques, soit à des informations au niveau moléculaire sur des éléments obtenus suite à des dégradations chimiques ou thermiques. Dans les deux cas, il faut noter que les éléments azote, phosphore et soufre sont très rarement pris en compte alors qu'ils participent aux fonctions de la matière organique.

Étudier les interactions azote – carbone pour une meilleure compréhension de la dynamique des matières organiques

L'azote est étroitement lié au carbone dans la matière organique et ces deux éléments agissent de concert. Pourtant, l'étude de l'azote organique est très peu développée surtout au niveau moléculaire. La matière organique est une source d'azote qui, à la suite du processus de minéralisation, aboutit à enrichir les hydrosystèmes (eaux de surface, aquifères et estuaires) en azote nitrique. La stabilité de la matière organique joue ainsi un rôle fondamental sur la production de nitrates vers les écosystèmes hydriques. Quel est le rôle de cette matière organique dans les processus de production d'azote minéral ? Quel est le pas de temps de sa dynamique ? Quel est l'impact de l'usage du sol et de la lithologie sur celle-ci ? On ne considère pas dans cette partie les effets des apports d'azote minéral.

En outre, le cycle de l'azote, via les réactions de nitrification et de dénitrification, constitue une source de gaz à effet de serre par la production de N_2O , certes bien moins abondant que le CO_2 mais beaucoup plus nocif. Quel est l'impact des changements climatiques sur l'activité de la matière organique et donc sur l'émission de N_2O ?

L'azote organique dissous n'est pas pris en compte (ou par défaut) dans les bilans de transfert d'azote réalisés aux échelles régionales. Les concentrations en azote organique, même si elles demeurent bien plus faibles que les concentrations en azote minéral, peuvent néanmoins être significatives. Les études menées sur l'azote organique dissous ont principalement porté sur l'interface eau – sédiment et essentiellement dans des grandes rivières ou des milieux marins. En revanche, peu d'études ont été consacrées aux petits cours d'eau, ou aux bassins versants dominés par l'agriculture.

Tout comme la matière organique « particulaire », l'azote organique dissous est une source d'azote (dans une moindre mesure). Et donc les mêmes questions s'appliquent à l'azote organique dissous (dynamique et émission de gaz à effet de serre).

L'étude des interactions azote – carbone est capitale pour la compréhension de la dynamique de la matière organique, les processus qui y sont associés étant dirigés par des organismes microbiens métabolisant l'azote et le carbone à des taux variables.

Déterminer la réactivité et la stabilité des matières organiques

Au-delà de la structure chimique de la matière organique, il est fondamental de déterminer sa réactivité et sa stabilité et d'en prédire l'évolution. Pour cela, il est impératif d'élucider les mécanismes de stabilisation, de définir une échelle de stabilité entre les différents constituants (celle-ci est déjà partiellement établie pour les petites molécules solubles mais pas pour les macromolécules) et de prendre en compte la matière organique dans son environnement, c'est-à-dire associée aux minéraux et à l'eau.

De tels travaux devront partir de l'expérimentation dans des sites parfaitement contrôlés (systèmes d'observation, sites de longue durée) pour aller jusqu'à la modélisation de la réactivité ou de la stabilité de la matière organique. On note qu'actuellement ces sites sont orientés soit vers des études sur les sols, soit vers l'hydrologie. Un couplage entre ces deux aspects est nécessaire et il passe par la mise en place de dispositifs intégrant le continuum « sol – bassin versant – rivière – sédiment – milieu marin laguno-côtier ».

■ L'écotoxicologie et l'écodynamique des contaminants

● Le contexte des recherches : protection des ressources en eau et sol et impact des activités anthropiques sur les écosystèmes et la santé humaine

Les eaux souterraines et superficielles ainsi que les sols sont des ressources fragiles et d'une importance primordiale pour l'économie, la santé et l'environnement. De même, l'air et l'atmosphère représentent une ressource longtemps oubliée, mais qui se trouve aujourd'hui au centre des préoccupations. Malheureusement ces ressources sont de plus en plus menacées par les activités humaines. Leur protection est devenue un enjeu majeur, notamment pour l'Europe avec la Directive Cadre sur l'Eau et la Directive fille (COM 2005) qui imposent de développer des stratégies de protection et de réhabilitation des milieux et de déterminer des valeurs seuils de polluants. Cette prise de conscience ne s'effectue pas seulement au niveau institutionnel, mais aussi et surtout au niveau sociétal (Grenelle de l'Environnement).

Ces risques de contamination des écosystèmes, et par voie de conséquence de la santé animale et humaine, augmentent en grande partie à cause de la production croissante de produits manufacturés (pesticides, hydrocarbures, détergents, plastifiants, particules atmosphériques (surtout les fines et ultrafines)), mais aussi de composés nouveaux comme les nanomatériaux (fullerènes, nanotubes de C, métaux et complexes métalliques oxydés ou non...) ou encore de résidus médicamenteux, auxquels s'ajoutent les molécules d'origine naturelle comme les phycotoxines ou les stéroïdes hormonaux.

Les enjeux scientifiques et sociétaux sont multiples :

- outre les pollutions accidentelles, les activités anthropiques génèrent principalement des multipollutions diffuses ; associé à l'évolution du climat, à l'émergence ou la rémanence de contaminants chimiques et biologiques, le traitement de ces pollutions et contaminations se révèle très difficile aussi bien à la source (industrie) que dans les milieux (atmosphère, eaux de surface, sols, eaux souterraines) ;

- le cadre réglementaire REACH pointe du doigt le déficit de connaissance des effets concernant les substances issues de la chimie (actuellement 30 000) ; il impose aux industriels des règles relatives à la non toxicité des produits ;
- il est nécessaire de développer des modèles de risques associés à la sécurité sanitaire, afin que les pouvoirs publics puissent légiférer à partir de données fiables et scientifiquement démontrées.

• Les priorités et les moyens à mettre en œuvre

Les questions scientifiques majeures et les priorités

Comme cela est mentionné ci-dessus, la question scientifique majeure à propos des contaminants concerne certainement l'effet des pollutions diffuses et chroniques sur le fonctionnement des écosystèmes et sur l'homme. En effet, même s'il existe un grand nombre de travaux concernant des sites contaminés par les activités industrielles et minières des siècles derniers, tout reste à faire concernant la dégradation globale des écosystèmes résultant de l'addition d'une multitude de sources (effet de l'agriculture intensive, du recyclage de déchets, des retombées atmosphériques liées à l'industrie et au transport...). On passe donc de l'étude des risques accidentels à l'étude des risques chroniques.

Dans ce cadre, il semble que les priorités doivent concerner l'étude :

- des multipollutions, dans la mesure où, dans le cas des pollutions diffuses, de nombreuses sources de polluants s'ajoutent au fond géochimique ;
- des impacts des polluants émergents, issus principalement des médicaments, et des particules de petite taille (atmosphériques et issues des nanotechnologies) ;
- de l'impact des filières de traitement et de valorisation des déchets.

Développer les recherches dans le cadre d'une approche pluridisciplinaire et globale

Les recherches sur les contaminants impactant les écosystèmes et la santé humaine doivent se mettre en place dans un contexte résolument pluridisciplinaire, associant l'étude des mécanismes hydrodynamiques, biogéochimiques, toxicologiques et écophysologiques. En effet, seule une approche intégrée permettra de lever les nombreux verrous actuels. Il s'agira de renforcer les liens à différents niveaux entre :

- l'écotoxicité, la géochimie et la biophysicochimie

À ce niveau d'intégration, il s'agit de déterminer les mécanismes réactionnels à l'échelle des interfaces eau – sédiment/sol – organisme vivant. Les notions de biodisponibilité et de spéciation s'avèrent essentielles.

- l'écotoxicologie et l'écologie

Il semble que ce lien, indispensable pour intégrer les effets des polluants au niveau des écosystèmes continentaux ou côtiers, n'existe pas, ou trop peu, en France.

Mieux comprendre les interactions entre contaminants et milieux

En ce qui concerne la dynamique des contaminants (transferts et transformations) et plus particulièrement dans le cas des multipollutions, il faut constater que les interactions entre les contaminants, les composants (biotiques et abiotiques) et les compartiments des milieux (eau, sol, air) sont insuffisamment bien comprises. Cela est lié au fait que les processus élémentaires de ces interactions opèrent à l'échelle moléculaire (adsorption/désorption, transformations rédox, métabolisation...). La caractérisation de ces interactions représente un réel challenge et nécessite de mobiliser des moyens lourds, des plateaux technologiques et des outils analytiques complexes et modernes, tels que le rayonnement synchrotron, la spectrométrie RMN, les méthodes couplées (séparatives, chromatographiques) et analytiques (les spectromètres de masse moléculaire), l'ensemble des techniques d'imagerie...

Au niveau de l'écodynamique des contaminants, il existe aussi des verrous importants. Par exemple, une meilleure quantification des dépôts éoliens au niveau des parties aériennes des végétaux, des sols et des surfaces aqueuses et une meilleure identification de la spéciation des contaminants issus de ces dépôts nécessiteront un effort particulier, dans la mesure où cette problématique a été peu prise en compte jusqu'à maintenant. Or le transfert par voie aérienne des pollutions diffuses est loin d'être négligeable. Un autre exemple concerne le transfert vers les nappes. Ce dernier ne peut être compris que si la question de l'hydrodynamique et des mouvements de fluide en milieu poreux est abordée et maîtrisée. Notamment, la caractérisation *in situ* de la texture et de la porosité de ces milieux représente toujours un verrou important.

Au niveau de l'impact des polluants sur le vivant, parmi les grands enjeux à résoudre, le premier est celui des échelles biologiques auxquelles on se situe. En effet, cela est essentiel pour comprendre le continuum d'effets par lequel des individus sont affectés avec des répercussions potentielles au niveau des populations et de la structure des communautés susceptibles d'altérer le fonctionnement des écosystèmes et des services écologiques. Le second grand enjeu concerne l'entrée des polluants dans les réseaux trophiques, avec les processus de bioaccumulation et de biotransformation associés pouvant en bout de chaîne affecter l'homme. Un autre enjeu est celui des échelles temporelles d'observation, les effets à courts termes étant relativement faciles à étudier avec des contraintes de temps gérables. En revanche, les pollutions chroniques nécessitent des études de plus longue durée et souvent avec des niveaux de contamination plus faible, sans oublier la prise en compte de polluants multiples. Néanmoins le développement de nouveaux outils moléculaires puissants pourrait apporter des solutions efficaces. Il s'agit des outils permettant l'étude du transcriptome, pour la caractérisation des gènes dont l'expression est modulée par les stress toxiques environnementaux, et du protéome, pour l'identification de variations d'expressions protéiques (inhibition ou surexpression). Ces outils permettent de renseigner sur les mécanismes et les effets directs et indirects des pollutions.

Un effort particulier doit être porté sur les substances dites CMR (cancérogènes, mutagènes, reprotoxiques). Plusieurs points sont à approfondir dans l'optique d'une meilleure compréhension de leurs effets toxiques environnementaux, comme l'analyse des conséquences de l'exposition des stades précoces sur les effets au niveau des populations ou encore l'étude

des effets trans-générationnels des contaminants chimiques. Un objectif à développer sera de mieux décrire les relations entre concentration externe, dose interne et effets biologiques au niveau individuel (approches pharmacocinétiques et pharmacodynamiques) et de les relier à celles impliquant les populations et les communautés.

Étudier l'impact des nanomatériaux sur les écosystèmes

L'étude des impacts des nanomatériaux sur les écosystèmes est très spécifique. Les nanomatériaux sont issus de techniques assez récentes de synthèse et constituent des matériaux dont les chimies sont variables à l'infini. Les études doivent porter sur les cinétiques et mécanismes d'altération, en particulier pour les produits de grande consommation, leur migration en milieu poreux et leurs transformations au contact des systèmes biologiques. En particulier, le stress oxydant semble devoir être un mécanisme général de toxicité. Du fait des craintes formulées par les États et les populations, il paraît important de ne pas restreindre ces études aux seuls écosystèmes mais de les étendre aux recherches *in vitro* sur des cellules humaines. Les approches de cytotoxicologie, de génotoxicologie et de mutagenèse sont particulièrement riches en information. Le cas des nanomatériaux issus des nanotechnologies offre également une opportunité à saisir pour développer des recherches de pointe sur les couplages entre la physicochimie et la toxicologie et sur les micro-organismes des milieux naturels et les cellules mammaliennes.

Étudier les effets des filières de traitement des déchets

Le recyclage et la valorisation des déchets représentent des alternatives importantes aux filières classiques de gestion des déchets que peuvent être l'incinération et le stockage. Tous les types de déchets (industriels, agricoles, urbains) peuvent être concernés par une valorisation. Dans tous les cas, il est indispensable de prendre en compte les impacts environnementaux des différentes filières afin d'établir un bilan entre avantages et inconvénients. L'étude des impacts à long terme fait appel aux points détaillés précédemment, à savoir une approche moléculaire des mécanismes de transfert des éléments couplée à des modélisations de type chimie-transport.

Participer à la démarche d'évaluation des risques écotoxicologiques

L'évaluation des risques écotoxicologiques (EDRE) est en pleine évolution sur le plan national et européen, en liaison avec le besoin de se doter d'un outil d'aide à la décision dans de nombreux domaines (e.g. étude d'impacts des installations industrielles, gestion des sites pollués et des friches urbaines, construction et entretien des infrastructures de transports et gestion des aménagements urbains). Toutefois, ces centres d'intérêt devraient pouvoir évoluer au fur et à mesure des progrès atteints, notamment ceux relatifs à la dynamique des multipolluants, leur dégradation, leur transfert dans l'environnement et leur impact sur les écosystèmes. Il s'agira en particulier de progresser dans la modélisation des systèmes complexes, de manière à mieux décrire les différents phénomènes mis en jeu et leurs couplages et à mieux comprendre leurs évolutions, notamment lorsqu'elles sont soumises à des perturbations externes. Une attention spécifique devra être portée sur l'estimation des incertitudes des modèles et des évaluations résultantes. Il conviendra également de disposer d'observatoires ou de sites de suivi à long terme pour la calibration et la validation des modélisations dans le cadre d'une approche de type systémique.

■ Le rôle de la biodiversité dans le fonctionnement des écosystèmes

• Le contexte des recherches

La biodiversité est un concept fédérateur, qui se décline en différentes composantes selon l'échelle de perception, l'objectif scientifique et le processus abordé. Elle peut être constituée par la diversité des stratégies adaptatives au sein des peuplements, par la diversité génétique ou phénotypique au sein des espèces ou encore par la diversité des fonctions écosystémiques ou des tactiques pour réaliser ces fonctions. La biodiversité, quelles que soient les composantes selon lesquelles elle peut être déclinée, constitue un élément clé des écosystèmes, dans la mesure où elle régit partiellement leur fonctionnement, au travers des biotransformations qu'elle réalise et des flux de matière et d'énergie entraînés par ces dernières.

La perte de biodiversité engendrée par les activités humaines soulève le problème urgent de déterminer l'impact de cette érosion sur le fonctionnement des écosystèmes. En effet, même si des progrès ont été réalisés dans la compréhension de l'impact des modifications environnementales futures sur la relation diversité-fonctionnement (voir Ecosystem Millenium Assessment), nos connaissances sont encore largement insuffisantes pour bâtir des outils opérationnels de gestion, de conservation et de restauration des écosystèmes et de leurs fonctions.

Alors que la valeur culturelle ou économique de la biodiversité (espèces emblématiques, ressources fournies ou potentiellement valorisables) est généralement prise en compte dans la gestion des écosystèmes, et constitue fréquemment un objectif de restauration, il n'en est pas de même de la valeur fonctionnelle de la biodiversité, qui est rarement considérée dans l'élaboration de stratégies de gestion des écosystèmes.

• Les priorités et les moyens à mettre en œuvre

Mieux comprendre les relations entre structure et fonctionnement

Le fonctionnement des écosystèmes est fortement dépendant des relations entre d'une part, le milieu physique (incluant ses variations spatiales et temporelles) et la biodiversité dans toutes ses composantes (génétique, taxonomique, fonctionnelle) et d'autre part, les interactions entre les différentes composantes de celle-ci (e.g. facilitation, prédation et mutualisme). La nature et l'intensité des biotransformations et des flux qui en découlent résultent de la manière dont les communautés sont structurées dans l'espace et le temps. Ces mêmes fonctions, en retour, vont fortement régir la manière dont l'écosystème va évoluer temporellement. La biodiversité est donc un paramètre qui varie au cours du temps et dont l'impact sur le fonctionnement de l'écosystème sera par conséquent variable. À titre d'exemple, les successions écologiques conduisent, dans certains écosystèmes, à une augmentation de la biodiversité, à une complexification des chaînes trophiques et à une augmentation de la résistance des écosystèmes aux perturbations. Ces résultats ne sont cependant pas toujours consistants d'un type d'écosystème à l'autre, et la question du rôle de la nature de l'écosystème ou de la zone climatique et géographique considérée reste ouverte.

De même, les nombreux débats autour de la relation entre diversité et stabilité des écosystèmes semblent montrer que cette propriété des écosystèmes repose tout autant sur la diversité dans son acception la plus simple que sur le contenu des communautés en place et la complexité des relations qu'elles entretiennent. En effet, la diminution de la richesse spécifique augmente l'intensité des relations interspécifiques, augmentant ainsi la probabilité de déstabilisation de l'écosystème.

Dans ce contexte, la compréhension de la manière dont ces trois composantes (biodiversité, complexité des chaînes trophiques et flux induits, résistance et résilience des écosystèmes) s'articulent et varient au cours du temps dans des écosystèmes contrastés est une étape essentielle dans la mesure du rôle de la biodiversité dans le fonctionnement des écosystèmes. De façon complémentaire, il est indispensable de mesurer les seuils d'altération de la biodiversité et les niveaux de contraintes maximales au-delà desquels les écosystèmes ne possèdent plus la capacité de réaliser les fonctions clés qui leur sont attribuées. Enfin, l'évaluation de la quantité d'énergie qu'il faudrait injecter dans l'écosystème et/ou son environnement pour la restauration de ces fonctions contribuerait à mieux évaluer le coût écologique et sociétal de la destruction des écosystèmes.

Intégrer l'influence de l'histoire et des usages

Dans le contexte de forte anthropisation qui caractérise l'immense majorité des paysages à l'échelon européen, une telle démarche ne peut faire abstraction de l'histoire des usages des écosystèmes (et des pressions et altérations associées) qui constitue un conditionnant majeur de leur fonctionnement actuel. La reconstruction de ces histoires (au travers de collaborations interdisciplinaires) est essentielle pour comprendre la réponse des écosystèmes aux stress multiples générés par le changement global. En particulier, cette histoire devrait nous aider à mesurer la vulnérabilité de ces écosystèmes face à de nouvelles altérations, ainsi que les seuils au-delà desquels les conséquences pour leur fonctionnement deviendraient irréversibles. Enfin, la traduction de la nature et de la gravité des altérations en termes de pertes de services reste encore largement à construire, bien qu'elle constitue l'essence des enjeux environnementaux qui seront négociés entre gestionnaires, société civile et scientifiques.

Renforcer les études sur la variabilité spatio-temporelle des groupes fonctionnels et de la résistance des écosystèmes

Par ailleurs, il semble important de renforcer les études portant sur la variabilité spatiale des fonctions au sein des écosystèmes. En effet, si la résistance et la résilience des écosystèmes aux événements extrêmes ou récurrents reposent sur le nombre et le degré d'hétérogénéité des unités fonctionnelles qu'elles contiennent, il convient alors de connaître la structure de celles-ci et la stabilité de la relation structure-fonction. En particulier, le rôle du turn-over des espèces et des gènes (individus génétiques présentant des traits, ou une plasticité de ces traits, contrastés) et le rôle de la hiérarchie des espèces (à contenu spécifique analogue) sont probablement essentiels pour mesurer la sensibilité d'un groupe fonctionnel (et donc des biotransformations et des flux qu'il réalise) aux perturbations de l'écosystème.

De manière plus ambitieuse, l'identification de groupes fonctionnels « taxon centré », c'est-à-dire répertoriés au sein d'une catégorie taxonomique (e.g. végétaux et insectes), peut se révéler réductrice et conduire à une approximation importante des flux associés à cette fonction. Ceci souligne l'importance de tenter de considérer les différents acteurs d'une fonction donnée dans un écosystème (e.g. oxydation du substrat), quelle que soit leur appartenance taxonomique (e.g. végétaux, oligochètes et insectes).

Enfin, 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, bien que des processus évolutifs rapides aient été récemment mis en évidence. À cet égard, les micro-organismes constituent un excellent modèle expérimental car ils permettent un rapprochement des temps évolutifs et fonctionnels.

L'intégration de la variabilité temporelle de l'environnement et de ses altérations (modifications graduelles ou stochastiques des variables environnementales, altérations des rythmicités saisonnières, événements paroxystiques) est également essentielle. Elle repose sur la combinaison de suivis à long terme des écosystèmes et de mise en place de dispositifs expérimentaux permettant de simuler ces variations.

La prise en compte de la variabilité des processus abiotiques, et tout particulièrement des processus physiques et de leur rôle en qualité d'énergie auxiliaire, doit également bénéficier de cet effort. La synergie entre les différents acteurs de la communauté SIC offre de ce point de vue les conditions les plus favorables pour que toute la variabilité de ces processus soit intégrée dans ces études.

Adopter aussi souvent que possible des approches comparées interécosystèmes

La pertinence des réponses apportées à ces différentes questions sera renforcée par la combinaison des approches comparatives (description des processus à l'échelle des écosystèmes) et des approches expérimentales (à l'échelle des écosystèmes ou en mésocosmes). Les expérimentations en vraie grandeur, comme 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. L'ensemble des questions peut être abordé à des échelles spatiales allant du micro habitat au biome. Le paysage constitue une échelle intermédiaire pertinente pour mesurer le rôle de la connectivité interécosystème (flux biotiques ou abiotiques de matière et d'énergie) sur le fonctionnement des différents éléments de la mosaïque paysagère, mais il sera souvent difficile de l'aborder dans son intégralité, en particulier avec le cadre méthodologique proposé ici.

Favoriser une démarche pluridisciplinaire

La portée scientifique et l'intérêt que la société pourrait trouver dans de telles problématiques reposent sur l'adoption d'une démarche pluridisciplinaire à l'échelle de l'ensemble de la communauté SIC, avec toutes les difficultés de mise en œuvre que cela sous-entend (mise en réseau difficile des compétences et des acteurs, échelles de perception différentes, concepts et questionnements divergents). Cet objectif repose donc sur la nécessité de la meilleure synergie possible entre les recherches portant sur l'organisation, la dynamique et la conservation de la biodiversité, en réponse ou non aux contraintes environnementales, et les recherches portant sur les processus et les fonctions des écosystèmes. Cette articulation permettrait assez rapidement d'aboutir à des outils accessibles et convaincants à l'endroit des décideurs et de l'opinion publique.

Enfin, il apparaît nécessaire de considérer la perception par les sociétés humaines du rôle de la biodiversité sur le fonctionnement des écosystèmes. En effet, la perception des services rendus par celle-ci est souvent vague, car reposant essentiellement sur sa valeur culturelle ou patrimoniale. Dans les agrosystèmes, des démarches visant à préserver la biodiversité dans le but d'améliorer la productivité ou de diminuer les coûts de production ont été amorcées. Concernant les écosystèmes « naturels », les avancées sont plus balbutiantes, probablement en partie à cause de la mauvaise connaissance de la relation biodiversité-fonctionnement dans la plupart d'entre eux et du fait que la communication autour de la gestion et la conservation de ces écosystèmes ne met pas suffisamment bien en exergue les fonctions qu'elles assurent. De surcroît, elles offrent souvent des bénéfices indirects aux sociétés humaines, ce qui rend leur pertinence plus difficile à percevoir que dans le cas de services directs.

Les interfaces entre milieux

Pendant longtemps, la démarche classique en sciences de la Terre a visé à décrire de façon indépendante le fonctionnement des différents compartiments du système terrestre (océan, atmosphère, surfaces continentales, cryosphère) avant de les inclure dans des modèles plus intégrés. Cette démarche a permis de réaliser des progrès considérables dans notre capacité à appréhender les évolutions passées, présentes et parfois futures des grands cycles biogéochimiques et du climat. Cependant, cette approche par milieux a aussi conduit à des difficultés de représentation des interfaces entre compartiments et de leur rôle dans le fonctionnement biogéochimique et climatique de la planète.

En effet, si les interfaces (considérées ici comme des milieux physiques exhibant de forts gradients ou des discontinuités) sont un lieu d'échange d'énergie ou de masse entre compartiments, elles constituent aussi des écotones au sein desquels des processus spécifiques se produisent, processus conduisant parfois à des propriétés émergentes en termes de structure et de dynamique de ces milieux. Ces processus sont pour la plupart mal connus, essentiellement par manque d'études dédiées. Par exemple, en ce qui concerne la matière organique, les études intégrées allant du sol à l'estuaire sont encore rares aujourd'hui et cette absence de données limite fortement la façon dont on peut appréhender son devenir. De même, les modèles de transfert du carbone et de l'azote entre les différents milieux sont encore peu avancés, principalement en raison de la méconnaissance des processus aux interfaces sol – végétation – hydrosphère – atmosphère.

Les interfaces doivent donc aujourd'hui faire l'objet de projets dédiés. Elles doivent être étudiées non seulement comme zone de transition entre milieux mais également en tant que système spécifique au sein duquel des processus propres à ce milieu, ayant des constantes de temps souvent très différentes, interagissent avec des phénomènes plus génériques pour faire évoluer la spéciation, l'intensité et la variabilité spatio-temporelle des flux de matière et d'énergie. Les stratégies doivent en particulier être adaptées afin que des processus ayant des constantes de temps et des échelles spatiales très différentes puissent être étudiés conjointement.

Enfin, les interfaces sont aussi le lieu où les interactions entre hydrodynamique, physicochimie, biologie et société sont parmi les plus fortes : elles vont donc constituer un chantier naturellement propice au développement d'approches interdisciplinaires. C'est notamment le cas de l'évolution de l'occupation des zones rurales et de la diminution de la plupart d'entre elles au profit des villes. La dynamique de cette interface à la fois dans sa dimension géométrique et dans sa forme relève de choix issus de l'action publique. Toutefois, celle-ci doit désormais intégrer la problématique environnementale qui inclue la gestion des ressources et des déchets, ou encore les notions de vulnérabilité ou de risque. Il s'agit de mettre en œuvre une approche systémique permettant d'aborder l'environnement urbain et périurbain dans sa globalité, intégrant les comportements humains et l'appropriation par les populations des résultats scientifiques et techniques.

Étudier ces questions, c'est-à-dire comprendre le fonctionnement des interfaces, quantifier les transformations, modéliser les processus spécifiques, prendre en compte la dimension anthropique, ne pourra se faire sans la mise en place de projets structurants, probablement très instrumentalisés et certainement inscrits dans la durée.

Cette prospective de la communauté « Surfaces et Interfaces Continentales » se doit naturellement de proposer, pour les interfaces dont elle a la responsabilité, des actions permettant d'améliorer significativement la connaissance de ces zones de transition. En particulier, nous développerons ici les actions envisagées aux interfaces continent – océan, surface – atmosphère et surface – souterrain. Néanmoins, dans un certain nombre de situations, comprendre le fonctionnement d'un système d'interfaces peut nécessiter de prendre en compte plus de deux compartiments. Pour cela, des projets fédérateurs (comme le « Chantier » Méditerranée) permettront, en liaison en particulier avec la communauté océan-atmosphère (pour laquelle la prise en compte des interfaces est également une des priorités affichées dans sa prospective), d'aborder de façon intégrée ces questions.

■ Les interfaces côtières

• Le contexte des recherches

Les écosystèmes marins côtiers se caractérisent par des gradients environnementaux naturels qui génèrent une grande « hétérogénéité » des systèmes à différentes échelles spatio-temporelles. Fournissant près d'un tiers des richesses de la planète, ces écosystèmes sont soumis, en raison de leur situation d'interface géographique, à de nombreuses pressions anthropiques dont les effets sont persistants et pour certains croissants. Également interfaces privilégiées entre nature et société, ils constituent le support de services et d'usages multiples. Ils sont paradoxalement moins bien connus que certains écosystèmes marins hauturiers ou profonds, du fait de leur complexité liée à certaines de leurs caractéristiques : hétérogénéité, réponses à des forçages multiples, importance des événements à très court terme...

• Les priorités et les moyens à mettre en œuvre

Conjuguer observations, plates-formes expérimentales, développements conceptuels et modélisation

Que l'on évalue et étudie les caractéristiques physiques, la biodiversité, les cycles biogéochimiques, les réseaux trophiques, la productivité ou l'état écologique des zones côtières, il est nécessaire de comprendre les processus sous-jacents et d'identifier et tester les concepts qui permettront de déterminer comment les propriétés des systèmes côtiers émergent à partir des échelles multiples et des interactions et couplages à différents niveaux. Il est donc nécessaire de conjuguer les outils d'observation, les plates-formes expérimentales, les développements conceptuels et la modélisation.

Adopter aussi souvent que possible des approches comparatives sur les écorégions les plus sensibles

Il est évident que l'expression des processus diffère d'un écosystème marin côtier à un autre et procède d'une dynamique devenue difficilement prédictible dans les écosystèmes soumis à des pressions multiples et parfois très spécifiques. Dans le cadre d'une approche comparative, des

chantiers doivent être mis en place sur les écorégions les plus sensibles (vulnérabilité naturelle, forçages anthropiques importants). Ils permettront aussi de décrire et d'évaluer l'état et les fonctions des écosystèmes et d'en dresser une typologie pour inventorier l'ensemble des réponses possibles à des scénarii de changement.

Considérer les approches rétrospectives

Identifier et expliciter les relations entre processus, fonctions associées, crises environnementales et pressions sur les écosystèmes constituent une clé pour comprendre et prévoir les modifications des services écosystémiques. Les approches rétrospectives sont ici essentielles pour prendre en compte l'évolution conjointe des systèmes et des usages. Les événements exceptionnels (e.g. crues et pollutions aiguës) tout autant que les tendances connues (changements globaux) et l'émergence de nouvelles pressions (e.g. accroissement des transports maritimes, changement d'occupation des sols et urbanisation côtière) sont à considérer et à comparer dans leurs conséquences aux différentes échelles d'organisation. Cette démarche implique *de facto* une association entre des équipes aux compétences disciplinaires et aux missions complémentaires.

Évaluer la vulnérabilité des écosystèmes marins côtiers et proposer des solutions de remédiation

L'implication des sciences sociales reste un enjeu important. Il s'agira en particulier :

- d'évaluer la vulnérabilité des territoires de la zone côtière et de construire les méthodes et les réponses qui permettront de définir les services écosystémiques et d'associer les acteurs dans des stratégies de gestion durable ;
- de proposer et tester des solutions de protection et de remédiation des fonctions des écosystèmes marins côtiers en prenant en compte la réalité des continuums continent – mer auxquels ils appartiennent, les connaissances relatives aux processus concernés et les conséquences sociales et économiques.

L'approche par scénarii est indispensable. Elle doit se construire en collaboration entre les disciplines environnementales *sensu lato* et les sciences humaines et sociales, et s'appuyer sur les outils de prévision et d'analyse prospective.

■ L'interface surface-atmosphère

• Le contexte des recherches

Les échanges entre la surface et l'atmosphère concernent à la fois l'énergie et la matière. Concernant l'énergie et l'eau, les flux en terrains complexes demeurent mal connus et mal paramétrés dans les modèles et cela a des répercussions significatives sur la qualité des simulations à visée biologique, météorologique ou hydrologique, en particulier aux échelles régionales et sub-régionales, échelles auxquelles on souhaite le plus souvent appréhender les impacts.

Généralement, à « terrain complexe » sont associées les notions d'hétérogénéité de relief, de couverture végétale, d'usage et de transition entre milieux. Un enjeu majeur de ces prochaines années sera donc nécessairement de définir des méthodologies permettant la prise en compte explicite du rôle des hétérogénéités de surface dans l'observation et la modélisation de ces flux. On mentionnera, par exemple, les zones à végétation éparse (comme les zones semi-arides) pour lesquelles les paramétrisations des forces de cisaillement et de chaleur latente sont peu satisfaisantes et où l'organisation structurelle du couvert végétal joue un rôle essentiel. L'exploitation des données collectées pendant AMMA (Aspects Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) devrait permettre de progresser sur ce point.

De même, le rôle de la microtopographie au travers de ses relations avec la végétation et les écoulements doit être mieux appréhendé et des démarches intégratives de ses effets à différentes échelles développées.

Enfin, les surfaces urbaines qui conduisent à une micrométéorologie spécifique (et qui donc influencent par exemple la dispersion des polluants) doivent être décrites non seulement en termes de variables moyennes mais également en termes de structure. Pour tous ces problèmes, l'échelle dite du paysage est l'échelle naturelle pour les études *in situ*, mais celles-ci devront être complétées par des travaux à la fois plus amont, comme ceux généralement conduits en soufflerie et plus aval comme la modélisation régionale.

• Les priorités et les moyens à mettre en œuvre

Mieux contraindre le bilan hydrique de surface

Le bilan hydrique de surface doit être encore mieux contraint. Outre les incertitudes évoquées ci-dessus sur les flux d'évaporation, les précipitations sont aujourd'hui, avec la vitesse du vent, les variables les moins bien simulées par les modèles météorologiques aux échelles locales et régionales. Il est donc essentiel de renforcer nos capacités d'observation à haute résolution des champs d'humidité atmosphérique, de précipitations et d'humidité du sol, notamment en exploitant le potentiel des nouvelles générations de sondeurs satellitaires (comme SMOS ou IASI) et en renforçant et adaptant les réseaux sol (par exemple GPS) pour leur assimilation dans les modèles. Par ailleurs, il est indispensable de mettre au point des méthodes fiables (car évaluées) de désagrégation spatiale des champs de précipitations observés ou simulés et de renforcer les développements sur la modélisation couplée atmosphère – végétation – sol.

Étudier et modéliser l'influence et l'impact des surfaces continentales sur les émissions atmosphériques

En termes de masse, les surfaces continentales sont une source majeure de nombreux composés gazeux ou particulaires pour l'atmosphère. Outre les sources anthropiques pratiquement toutes localisées à la surface des continents, les surfaces continentales contribuent aussi très fortement (> 80 %) aux émissions de composés organiques volatiles (COV) via l'émission de composés relargués par la végétation (de types terpènes). Ces composés sont essentiels puisqu'ils contribuent très fortement d'une part à la formation de panaches de pollution photo-oxydante et d'autre part à la formation d'aérosols organiques secondaires (avec des impacts climatiques).

De même, les modifications des pratiques agricoles, en particulier l'épandage des fertilisants azotés ou des produits xénobiotiques, affectent les concentrations atmosphériques d'espèces sensibles comme les NO_x ou de polluants organiques. Dans ce domaine, les enjeux actuels concernent principalement l'élaboration de modules mécanistiques décrivant précisément les flux d'émission de ces composés à haute et basse fréquence ainsi que l'évolution de ces émissions en liaison avec les modifications d'usage des sols et des conditions environnementales.

Des expériences *in situ* permettant de mesurer ces flux en liaison avec les paramètres biologiques, pédologiques et météorologiques sont nécessaires pour identifier les variables d'intérêt, quantifier leur rôle et en déduire des paramétrisations que l'on espère explicites et utilisables dans les modèles.

Les surfaces agricoles représentent également des sources importantes de particules minérales pour l'atmosphère lorsqu'elles sont soumises à des vents forts. Ceci est particulièrement important lorsque le sol est sec, c'est-à-dire dans les zones semi-arides ou en été aux latitudes tempérées. Des travaux récents suggèrent que les modifications des pratiques agricoles dans les pays en voie de développement (mécanisation, introduction d'outils de labour mal adaptés, mise en culture intensive) pourraient dans l'avenir affecter très notablement le contenu de l'atmosphère en aérosol (jusqu'à représenter 50 % des émissions). Il est indispensable d'une part, de quantifier précisément ces phénomènes d'érosion éolienne au travers de campagnes de mesure bien ciblées afin de tester les modèles disponibles et d'autre part, d'évaluer les pratiques les plus dégradantes, en fonction du type de sol et de culture, et de proposer des méthodes optimisant l'usage des sols (outils adaptés, calendrier des labours...). Certains gaz ont également un effet nocif pour la végétation : il a été montré que dans certaines zones européennes la pollution à l'ozone se traduit par des baisses de rendement agricole de l'ordre de la dizaine de pourcent.

Pour beaucoup de ces polluants, les outils numériques permettant de cartographier quantitativement ces retombées existent. Il reste donc à établir leur impact aux travers d'études couplant modélisation et expérimentation en quelques sites bien choisis et bien instrumentés dont l'objet sera d'une part, de vérifier la pertinence des dépôts simulés et d'autre part, d'identifier des indicateurs précis des effets suspectés (rendements, pourcentage de feuilles nécrosées, niveau de concentration des métaux dans les plantes...).

Réunir en une problématique scientifique unique les dépôts de polluants atmosphériques et leur devenir dans les écosystèmes

Inversement, l'atmosphère est également un vecteur de matière pour les surfaces continentales. Au travers du dépôt par voie sèche ou humide, nombre de polluants sont redistribués à grande échelle et viennent polluer (et plus rarement fertiliser) les milieux récepteurs. En particulier, les impacts environnementaux des apports atmosphériques de POP, de certains métaux ou de bioparticules (dont les pollens) restent aujourd'hui mal cernés, car souvent étudiés indépendamment de leur devenir dans le milieu récepteur.

■ L'interface entre les milieux superficiels et souterrains

• Le contexte des recherches

Les milieux superficiels et souterrains (sols, sédiments présents dans les lits de rivières ou roches) sont excessivement complexes et constituent des lieux de transformations et d'échanges intensifs.

Leur complexité est essentiellement liée :

- à la nature des phénomènes élémentaires, qu'ils soient d'origine physique, chimique, géochimique ou biologique ;
- aux comportements fortement non linéaires et aux temps caractéristiques très différents des différents processus en synergie ;
- à la présence simultanée de plusieurs phases miscibles ou non : gazeuse (air, produits volatils), liquide (eau, solvant, hydrocarbures...) et solide (minéraux, matières organiques) ;
- à une très forte variabilité spatiale à courte distance des propriétés physiques et des paramètres de transfert, de transport et de transformations abiotiques et biotiques ;
- à une évolution temporelle importante des états de surface sous l'effet des précipitations, des modifications de l'occupation des sols et des pratiques culturales, de l'activité biologique...

Ces processus élémentaires se développent à des échelles différentes (Figure 1) avec des actions et rétroactions importantes, l'ensemble conférant à cette interface une très forte variabilité fonctionnelle.

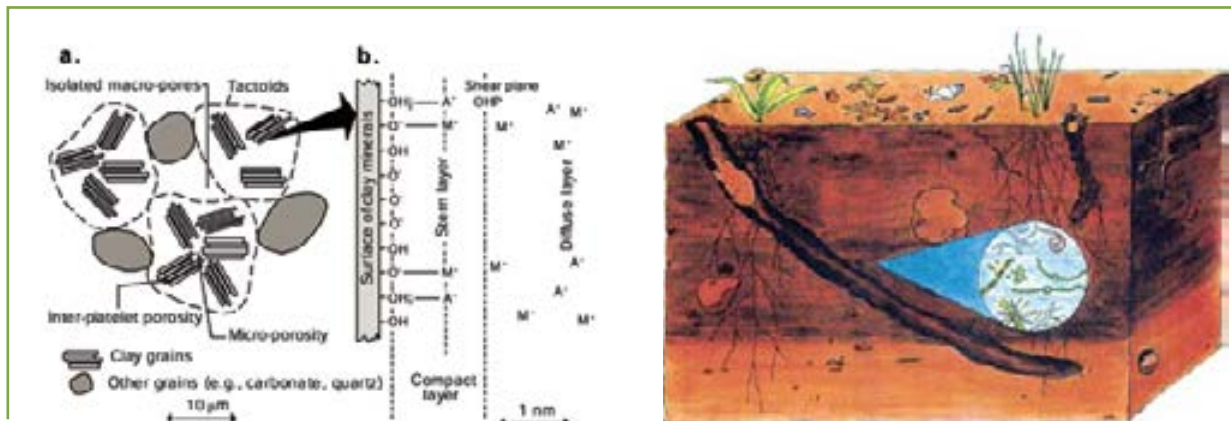
• Les priorités et les moyens à mettre en œuvre

Poursuivre la compréhension et la modélisation des processus élémentaires

Au cours des dernières décennies, la communauté scientifique est parvenue à des avancées significatives dans la compréhension et la modélisation de quelques processus fondamentaux intervenant dans le fonctionnement et la dynamique des surfaces continentales. Pour l'essentiel, elles ont été obtenues à des échelles où les niveaux d'hétérogénéité spatiale étaient volontairement et légitimement faibles. Cette approche reste indispensable pour interpréter les observations réalisées en conditions réelles. Cependant, les lacunes de connaissance se situent essentiellement au niveau de la compréhension des processus élémentaires intégrant le rôle du vivant, la dynamique des écoulements multiphasiques et/ou préférentiels et le transport multispèce avec interactions entre les phases fluides et minérales.

Renforcer les études sur les hétérogénéités

La prise en compte explicite des hétérogénéités (continues ou discontinues, déterministes ou stochastiques, unimodales ou multimodales) constitue un enjeu majeur pour ces prochaines années. Il ne s'agit plus de les gommer, en agrégeant des unités fonctionnelles supposées indépendantes, mais d'en analyser le rôle sur les phénomènes de transfert et de transport de façon à pouvoir développer des modélisations applicables à ces échelles. À cet égard, l'échelle du paysage devra être privilégiée. C'est à cette échelle que les interactions



atmosphère – biosphère – hydrosphère – pédosphère (eau, énergie, aérosols, particules solides...) et les couplages entre les processus physiques, chimiques et biologiques sont particulièrement forts. C'est également le lieu où l'action de l'homme est la plus prégnante et où s'élaborent et s'évaluent les politiques d'aménagement des territoires, de gestion des ressources et de prévention des risques.

Réunir les hydrosystèmes superficiels et souterrains en une préoccupation unique

Beaucoup de travaux expérimentaux, théoriques et numériques sont menés sur les hydrosystèmes superficiels d'une part et souterrains d'autre part, avec des avancées très significatives dans les deux cas. Il s'agit maintenant de faire porter l'effort sur le continuum surface – sol – nappe. En effet, les interactions du milieu souterrain avec les écoulements et le transport de surface, notamment lors de phénomènes extrêmes, ne sont plus à démontrer. Il en est de même de l'influence du statut hydrique des sols et des aquifères sur les états de surface, lesquels conditionnent la genèse et la propagation du ruissellement, moteur de l'érosion et vecteur du transport superficiel des nutriments et des contaminants chimiques et biologiques. Les changements climatiques attendus peuvent (vont) se traduire par des modifications des forçages, notamment du régime des précipitations (pluie, neige) pour lequel les liens avec les différentes composantes du cycle hydrologique (ruissellement, infiltration, évapotranspiration, recharge des aquifères) sont complexes et seront difficilement élucidés sans cette approche unifiée. Là encore, le rôle joué par les hétérogénéités doit être pris en compte.

Cette approche de continuum doit être étendue aux interfaces côtières, systèmes aux interactions également complexes, soumis à de fortes pressions anthropiques et contrôlés par des processus aux temps caractéristiques très différents.

Mieux décrire le fonctionnement des interfaces en régime d'intermittence

Le fonctionnement par intermittences est une des caractéristiques de ces interfaces. Les effets de cumul peuvent avoir des conséquences désastreuses sur de tels systèmes, en fonction de la fréquence des sollicitations et de leur temps de réponse. C'est notamment le cas de l'infiltration-ruissellement lors d'épisodes pluvio-orageux, des inondations par drainage ou débordement de nappes, des étiages des cours d'eau lors des sécheresses. Les principales lacunes concernent :

- l'impact de la zone non saturée sur la genèse des crues et inondations ;
- la reprise du sol par évapotranspiration et la partition entre évaporation, transpiration et recharge des horizons plus profonds ;
- les échanges physiques, chimiques, biologiques et écologiques entre les nappes et les cours d'eau, sous différents régimes hydrologiques, notamment en périodes d'étiage.



Figure 1.

Quelques échelles élémentaires de l'interface surface – souterrain [figure de gauche issue de : P. Leroy et al., *Journal of Colloid and Interface Science* 296 (2006) 248–255]

Nature et impacts des changements globaux

■ Le contexte des recherches

Par changements globaux, ou changement environnemental planétaire, il faut entendre l'ensemble des modifications de différentes natures (climat, composition de l'atmosphère, désertification, eutrophisation, pollution, érosion de la biodiversité et des habitats, utilisation des terres...) qui, en affectant les écosystèmes aquatiques et terrestres de notre planète, altèrent sa capacité à y soutenir la vie. Le défi principal quant aux impacts des changements globaux actuels et futurs tient dans notre capacité à développer des recherches qui permettent simultanément d'identifier et de mesurer à une échelle régionale :

- l'évolution des différents forçages environnementaux (T, UV, dépôts, pH...) liés à des perturbations anthropiques à distance (émissions de gaz, aérosols...) mais aussi d'origine plus locale (usage des terres, engrais, aménagements, utilisation-prédation des ressources...);
- les réponses des écosystèmes, de leurs composantes (physiques, chimiques et biologiques) et de leurs fonctions, à la conjugaison de ces différents forçages, et ce, dans le but d'élaborer des schémas prédictifs robustes de l'évolution des écosystèmes et des services associés et de proposer des outils et méthodes destinés à amoindrir l'effet de ces changements

Les services écosystémiques associés à certaines fonctions sont eux aussi affectés et constituent le plus souvent la partie visible de l'iceberg des effets de changements globaux et une porte d'entrée pour les recherches de plus en plus fréquemment utilisées en lien avec la notion de crise environnementale.

Il s'agit d'une problématique nécessitant des actions transversales à plusieurs communautés scientifiques, susceptibles de générer des avancées d'ordre méthodologique et de participer à des projets communs dont les contours relèvent certes des SIC, mais aussi de OA, de SdV et de SHS. L'identification et la quantification des processus propageant les changements globaux au travers des interfaces constituent un enjeu majeur à décliner.

■ Les priorités et les moyens à mettre en œuvre

Identifier et étudier l'effet combiné de plusieurs forçages anthropiques sur les écosystèmes terrestres et aquatiques

Les priorités de recherche peuvent donc être définies en référence aux forçages dont on connaît aujourd'hui les tendances d'évolution et/ou aux systèmes écologiques et à leurs fonctions associées les plus menacés par ces forçages que ce soit en termes de vulnérabilités et/ou de valeurs écologiques, sociétales et économiques.

Si une grande importance est accordée, à juste titre, aux impacts des modifications climatiques, il est essentiel de ne pas perdre de vue que de nombreux autres forçages récurrents ou émergents s'exercent sur les écosystèmes terrestres et aquatiques. L'anthropisation de notre planète produit non seulement des gaz à effet de serre, mais également un volume croissant de déchets solides et liquides de natures très variées. Les changements d'usage des terres et l'intensification des prélèvements sur les ressources naturelles terrestres et aquatiques touchent également l'ensemble des surfaces et interfaces continentales.

Les recherches actuelles montrent de manière récurrente que la réponse des écosystèmes à ces différentes contraintes ne peut être déduite de la connaissance individuelle de l'effet de chacune d'entre elles et que les écosystèmes possèdent souvent des capacités considérables d'amortissement d'une contrainte appliquée seule, mais que l'ajout de nouvelles contraintes entraîne souvent une dégradation accélérée ou d'amplitude bien supérieure à celle que l'on pouvait attendre. Cette question de la réponse aux stress multiples est une problématique essentielle en écologie, pour qui veut établir des schémas valides d'évolution des écosystèmes, tant terrestres qu'aquatiques. Pour de nombreux écosystèmes, il est donc essentiel d'identifier et d'étudier l'effet combiné de plusieurs forçages d'origine anthropique.

Si de nombreux progrès ont été réalisés dans la compréhension des processus d'évolution des composantes des systèmes écologiques sous l'effet de certains forçages, ceux gouvernant leurs interactions sont encore loin d'être tous connus et méritent un effort de recherche accru à travers une pluridisciplinarité renforcée. Dans ce contexte, il serait par exemple crucial de mesurer la capacité de résistance des écosystèmes dans toutes leurs composantes (habitats, communautés et processus associés) aux modifications des contraintes physiques liées à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes (aléas climatiques ou hydrologiques) combinés à des pollutions diffuses ou chroniques (substances toxiques ou nutriments). Ces processus conditionnent les fonctions essentielles qui supportent les services écosystémiques. À différentes échelles, il est urgent de mieux comprendre notamment le lien entre l'hétérogénéité *sensu lato* des systèmes, leur connectivité et le maintien de leurs fonctions.

Élaborer des schémas prédictifs robustes de l'évolution des écosystèmes et des services associés et proposer des méthodes et outils de mitigation

L'amélioration du « diagnostic » des impacts des changements globaux doit s'accompagner de travaux visant à proposer des « remèdes ». Agir à la source des problèmes est et restera indispensable. Cependant, compte tenu de la vitesse et de l'intensité de certains changements, il est nécessaire de pouvoir proposer/tester des options de protection mais aussi, dans de nombreux cas, engager des opérations de remédiation (ingénierie écologique). Dans ce domaine, la communauté des SIC doit s'approprier de nombreuses questions qui concernent la mesure de la vulnérabilité des systèmes en regard d'intérêts souvent conflictuels, la proposition d'actions de lutte contre les effets néfastes des changements globaux et l'évaluation de leur efficacité, dans une perspective visant à concilier réellement développement et durabilité des opérations de restauration.

Mettre en œuvre une approche interdisciplinaire intégrée et partenariale

Les recherches sur les effets des changements globaux nécessitent une interdisciplinarité exemplaire et une coordination tout aussi exemplaire des différents Organismes. Les efforts doivent notamment contribuer à développer à l'échelle nationale et internationale des réseaux de collaboration et une mutualisation des compétences et des moyens. Dans ce dernier domaine, de nombreux outils sont encore à développer et partager. Ce sont ceux de l'observation, de l'expérimentation et de la modélisation, pour lesquels le

concept de systèmes d'observation est essentiel pour assurer une pérennité d'acquisition de données compatible avec les échelles de temps des phénomènes étudiés.

L'expérience de ces dernières années montre en effet, qu'à l'instar des campagnes océanographiques qui ont « forcé » la pluridisciplinarité par une unité de lieu et de temps, les chantiers partagés sur les surfaces et interfaces continentales peuvent porter les mêmes fruits. Ces sites doivent être prioritairement ceux où les pressions anthropiques sont particulièrement fortes (e.g. les milieux urbanisés et/ou laguno-côtiers et les agrosystèmes) et qui permettent d'élaborer et de tester la généralité ou la spécificité des concepts.

L'approche historique est également ici essentielle, l'héritage du passé constituant le point de départ de la situation actuelle, en ce qui concerne notamment l'état des sols et la biodiversité. Bien souvent les données existent, mais elles ne sont pas toujours bien organisées, voire mal inventoriées. Il convient de favoriser la mutualisation des métadonnées et des bases de données (écologiques, d'occupation des sols, météorologiques, hydrologiques, satellitaires, historiques...).

Alors que le dispositif national et international est maintenant bien structuré sur la thématique des changements climatiques et de leurs effets à grande échelle, l'effort doit porter maintenant sur la régionalisation des impacts et l'intrication subséquente des échelles spatiales et temporelles, grâce notamment à une nouvelle génération de calculateurs.

En retour, l'impact régional de l'utilisation des terres sur le fonctionnement du Système Terre doit constituer un élément clé dans l'élaboration d'actions spécifiques nationales dans le domaine transverse ESSP (Earth System Science Partnership) liant les communautés du climat, de la biogéochimie, de la biosphère, de la biodiversité, des sciences humaines et sociales et de la gestion des territoires. Dans cette optique, une co-définition d'actions programmatiques avec l'ensemble des Organismes concernés devrait être recherchée et organisée.

Quelques projets d'actions coordonnées

Plusieurs projets transversaux ont été proposés. Ils visent à initier ou à développer, dans le cadre d'une démarche pluridisciplinaire, des travaux focalisés sur quelques-unes des actions prioritaires énoncées ci-dessous.

■ Le bassin méditerranéen

• Le contexte des recherches

Sur le plan scientifique, la région méditerranéenne est un lieu privilégié pour l'étude des couplages entre l'océan, l'atmosphère, les écosystèmes et les hydrosystèmes continentaux littoraux et côtiers. Un bassin océanique quasiment fermé, une orographie marquée sur son pourtour, un climat très contrasté et une forte urbanisation constituent des particularités géographiques qui confèrent au bassin méditerranéen une complexité particulière. Les interactions et rétroactions du système couplé jouent un rôle prépondérant sur les dynamiques géophysiques et biologiques. Elles sont fréquemment à l'origine d'événements extrêmes tels que pluies intenses et crues en automne, sécheresses et feux de forêts en été.

Parallèlement, la demande sociétale y est très prégnante, aussi bien au Nord qu'au Sud du bassin. Elle porte notamment sur une meilleure identification des zones à risques et un meilleur système de prévision, avec des alertes plus précises pour aider à leur gestion.

• Le projet et les moyens à mettre en œuvre

L'aspect pluridisciplinaire de ce projet ainsi que les retours d'expérience de projets antérieurs sur la Méditerranée ont conduit les communautés OA et SIC à proposer une initiative coordonnée sur cette région. L'objectif est la mise en place d'actions de recherches intégrées visant à décrire, quantifier et modéliser la variabilité spatio-temporelle des flux aux interfaces du système couplé (atmosphère – surface continentale – océan) à différentes échelles d'intérêt (de la parcelle à l'échelle régionale, de l'évènement météorologique à l'échelle climatique).

Dans le domaine particulier des surfaces continentales, les questions concernent :

- l'évaluation quantitative des forçages (pluie, bilans radiatif et énergétique) ;
- le bilan hydrologique et le devenir de l'eau en termes de quantité et de qualité, avec un regard particulier sur les apports en nutriments et l'impact sur les ressources, notamment halieutiques ;
- les processus hydrologiques et hydrochimiques, en s'attachant notamment aux spécificités méditerranéennes (variabilité et hétérogénéités des surfaces, zones karstiques, zones laguno-urbaines...) ;
- la dynamique de la végétation et la vulnérabilité des espèces et des écosystèmes aux changements climatiques ;
- la co-évolution des ressources en eau et de l'occupation des sols.

Les zones d'interfaces littorales et leurs bassins versants doivent également faire l'objet d'une attention particulière focalisant sur la compréhension des effets des pressions multiples qu'ils subissent et de leur vulnérabilité à celles-ci. Une approche comparative des systèmes littoraux localisés au Nord et au Sud du bassin Méditerranéen serait à développer en la construisant sur des bases interdisciplinaires pour identifier les forçages passés, actuels et à venir, en comprendre les origines et en mesurer et/ou prédire les effets sur la structure et le fonctionnement de ces écosystèmes et sur les biens et services qu'ils procurent.

Pour mener à bien cet ensemble d'actions, qui comprendront des périodes d'observation intensive entre 2010 et 2015, le renforcement en moyens *in situ*, aéroportés et de modélisation, est indispensable. Il est apparu nécessaire de mettre en réseau les différents systèmes d'observation et d'expérimentation et ce, dans un cadre communautaire, aux plans national et international. La dynamique apportée par les observations depuis l'espace, à travers les paramètres de surface, sera également déterminante.

Dynamiser les interactions entre chercheurs relevant de différentes communautés scientifiques, et confrontés à des questionnements multiparamétriques avec fort impact humain, demandera également la mise en place de méthodes et d'outils adaptés à la co-construction de l'interdisciplinarité.

■ Les systèmes et milieux urbanisés

• Le contexte des recherches

Les conclusions du colloque de Strasbourg dédiées aux Systèmes et Milieux Urbanisés ont mis en avant une méthode de travail : la co-construction de projets dans le cadre d'une action durable et cinq priorités autour desquelles pourraient s'organiser les recherches interdisciplinaires sur le milieu urbain. Ces priorités sont les suivantes :

- les systèmes d'observation ;
- les scénarii d'évolution des systèmes urbains ;
- la modélisation de la ville : enjeu de recherche majeur ou utopie ? ;
- les vulnérabilités et les risques environnementaux en milieu urbain ;
- l'évaluation de l'action publique, en prenant en considération l'environnement au sens large.

• Le projet et les moyens à mettre en œuvre

Les observatoires urbains sont apparus de façon unanime comme un moyen fort pour engager des projets interdisciplinaires. De tels observatoires, qui restent formellement à créer, pourraient s'appuyer sur des structures déjà existantes ou tirer parti d'initiatives et d'expériences récentes. Il conviendra notamment de prendre en compte les acquis des sites déjà investis en hydrologie urbaine (e.g. conurbations lyonnaise, marseillaise, nantaise et parisienne), des campagnes expérimentales lourdes réalisées en météorologie urbaine (e.g. ESQUIT, ESCOMPTE et CAPITOU) et des Systèmes d'Information des Mobilités des Déplacements Quotidiens pour les sciences humaines et sociales.

Il est suggéré que les thèmes qui seraient soutenus dans ce cadre soient dirigés/intégrés vers une action co-construite et durable de compréhension systémique du fonctionnement urbain et vers une structuration en réseau assurant synergies et complémentarités.

L'interdisciplinarité est à encourager à l'intérieur de la communauté SIC autour de sujets tels que l'hydrologie des bassins versants périurbains, les conséquences des retombées atmosphériques sèches sur la qualité des eaux et des sols en ville ainsi que sur les réseaux trophiques.

La dynamique qui s'est créée à l'occasion du colloque pourrait prendre diverses formes :

- un soutien à des actions en cours avec l'objectif de promouvoir des projets précurseurs capables d'assurer dès à présent une certaine dynamique et une bonne visibilité aux questions interdisciplinaires urbaines ;
- une incitation à présenter, au travers de lettres d'intention, les objectifs poursuivis et un planning de préparation, avec un délai suffisant (1 an) pour construire le projet lui-même ;
- la rédaction d'un « livre blanc » détaillant, à partir de l'établissement d'un état de l'art international, les sujets de recherche prioritaires et des modalités de collaborations interdisciplinaires sur ces systèmes, afin d'établir les bases solides d'une structuration d'actions à long terme ; l'articulation avec le futur programme « Ville et Environnement » ne devra pas être ignorée.

■ La suite d'AMMA

• Le contexte des recherches

Pour ce qui concerne les communautés SIC investies dans le programme AMMA, l'objectif est l'exploitation des données déjà recueillies sur la période 2002-2007 et à recueillir jusqu'en 2009, grâce notamment à l'ORE/SO AMMA-CATCH, par la mise en œuvre d'une stratégie intégrée de modélisations mécanistes et d'assimilation de données satellitaires prenant en compte les missions actuelles et à venir (SMOS pour l'humidité des sols, Megha-Tropiques pour le cycle de l'eau). De façon plus spécifique, les perspectives s'articulent autour de quatre questions.

• Les priorités et les moyens à mettre en œuvre

Mieux comprendre le fonctionnement couplé de l'écosystème d'Afrique de l'Ouest sous pressions anthropique et climatique

La modification de la couverture végétale sur de grandes surfaces modifie le cycle saisonnier de certains facteurs et composantes du cycle de l'eau (albédo, coefficients de ruissellement, couverture du sol) qui interagissent avec le régime pluviométrique. En conséquence, certains grands équilibres s'en trouvent changés tels que le partage entre les zones à fonctionnement hydrologique hortonien dominant et les zones à fonctionnement contributif prépondérant, la partition

entre l'infiltration jusqu'à la nappe et le ruissellement de surface ou encore les aires à dominante pastorale ou à prépondérance agricole. Comprendre comment ces modifications se mettent en place et comment elles influencent les grands termes du bilan hydrologique régional est impératif pour parvenir à une modélisation du système couplé et anticiper le fonctionnement de ce système sous différents scénarii climatiques.

Pour cela, il est prévu :

- de poursuivre les observations de long terme (pour la documentation de la variabilité interannuelle, des effets mémoire et des tendances lourdes pluriannuelles), en intégrant aussi étroitement que possible les aspects satellitaires ;
- d'explorer plus en détail le fonctionnement de certains compartiments, notamment la zone non saturée (altérites, bas fonds) et la couche limite surface – atmosphère, à l'aide d'une instrumentation spécifique (hydrogéophysique, scintillométrie micro-ondes).

Des efforts restent par ailleurs à fournir pour valider certaines paramétrisations du ruissellement latéral et du ruissellement vertical de la modélisation des bassins versants à la mésoéchelle. L'ensemble de ces actions doit tendre vers le développement de modélisations couplées hydrologie – végétation pour les régions tropicales.

Accorder une priorité aux rétroactions de la surface sur la dynamique régionale de la mousson

Le rôle des rétroactions des surfaces continentales sur la dynamique de la mousson Ouest-Africaine est un des questionnements fondamentaux qui ont conduit à la mise en place du programme AMMA. La mobilisation sur cette question est encore faible, bien que plusieurs instruments mis en œuvre dans AMMA fournissent des données pertinentes pour de telles études.

Une exploitation systématique et coordonnée des données avec les atmosphériciens devrait être une priorité de la communauté des surfaces continentales dans les années à venir. Elle pourrait permettre de mettre en lumière certaines inadéquations de la stratégie expérimentale de la période renforcée d'observation et de guider la définition de nouvelles expérimentations spécifiques. La définition d'une stratégie d'utilisation des données SMOS et Megha-Tropiques devrait aussi être prioritaire.

Enfin, une attention particulière sera portée sur les échelles auxquelles il est possible de mettre en évidence les rétroactions et sur celles qui sont avant tout du domaine de la modélisation, laquelle doit être validée indépendamment.

Prêter une attention particulière à l'étude des impacts

Le fonctionnement des surfaces continentales est au cœur de la thématique des impacts de la variabilité climatique sur les populations, soit directement (agriculture, ressources en eau), soit indirectement (santé *via* le cycle de l'eau ou les soulèvements de poussière). Au-delà des approches classiques par imbrication de modèles qui ont commencé à se mettre en place, il convient de renforcer les études sous l'angle socio-économique, grâce notamment aux soutiens financiers apportés à AMMA par l'Europe et par le programme RPIECSA du MAE.

Au-delà de ces priorités, la problématique devrait pouvoir également constituer un élément clé dans l'élaboration d'actions nationales et internationales dans le domaine transverse des impacts des changements globaux (ESSP).

Maintenir une communauté scientifique

Il conviendra de s'interroger sur la façon et les moyens de maintenir une communauté sur l'Afrique de l'Ouest autour de la problématique de la mousson et de ses impacts dans une triple perspective :

- assurer une bonne exploitation et valorisation des données, notamment autour des thèmes intégrateurs ;
- maintenir une bonne visibilité française, qui est leader sur ce domaine et qui a beaucoup investi, aux plans des personnels et des Organismes de recherche (Pays du Nord et du Sud compris) ;
- penser au long terme des Systèmes d'Observation mis en place ; à cet égard, l'espace à donner aux projets fortement structurés, par rapport aux actions plus limitées mais potentiellement tout aussi innovantes, doit faire l'objet d'une réflexion stratégique des tutelles.

Observation et expérimentation : méthodes et outils

■ Les dispositifs d'observation

Les Surfaces et Interfaces Continentales sont le support des écosystèmes anthropisés les plus modifiés par l'activité humaine, l'essentiel de cette activité y étant concentré. Les pressions anthropiques croissantes et diversifiées y induisent des transformations et des risques nouveaux qu'il convient de renseigner et d'évaluer pour fonder scientifiquement les politiques de prévention, d'adaptation et de réparation.

La complexité et l'inertie des systèmes considérés, qu'ils soient naturels ou sociaux, jointes à la forte variabilité spatio-temporelle des forçages climatiques et anthropiques nécessitent l'acquisition sur le long terme de données fiables et spatialisées permettant l'identification des tendances évolutives, la détection des ruptures d'équilibre, l'estimation de l'occurrence et des effets de phénomènes exceptionnels donc rares et, *in fine*, une meilleure compréhension et modélisation des différents processus impliqués.

Un aspect sans doute spécifique aux SIC est de recourir à l'expérimentation, notamment à long terme, par la « manipulation » des facteurs environnementaux et des pressions anthropiques à des échelles fines, depuis celle des micro et mésocosmes jusqu'à celle des écosystèmes exploités (parcelle des agroécosystèmes, massif forestier, bassin versant d'ordre 1).

On trouvera en annexe, la liste des différents systèmes d'observation qui ont été à ce jour labellisés, soit au titre des ORE du Ministère de la recherche, soit comme Services d'Observation de l'INSU, soit comme Zones Ateliers du Département EDD.

Compte tenu de leur problématique scientifique, certains dispositifs bénéficient de la complémentarité de Services d'Observation qualifiés « opérationnels » tels que ceux de Météo France, du MEDAD, d'EDF, d'Ifremer et des collectivités territoriales pour la France, et des Services Nationaux de la Météorologie et de l'Hydraulique à l'étranger.

Le projet de création de l'Observatoire de l'Environnement de surface autour du site de stockage Meuse/Haute-Marne de l'Andra pourrait constituer également une opportunité d'études pour le suivi et l'expérimentation à très long terme (la centaine d'années) de l'hydro-pédosphère, de la biosphère et

de l'écosphère continentale d'une part, et des comportements socio-économiques d'autre part.

Un aspect très positif de ces quatre dernières années aura été la création, en 2004 par la Direction de l'Enseignement Supérieur, de postes CNAP au titre de la Section des Surfaces Continentales, de l'Océan et de l'Atmosphère (SCOA) dont une partie, certes encore faible mais néanmoins significative, va contribuer à l'animation et la coordination scientifiques des services dédiés aux SIC.

Le colloque de prospective a clairement montré la très forte attente de la communauté SIC au sens large pour la construction de systèmes d'observation de l'environnement à différentes échelles. Les outils ORE, SO et ZA sont apparus complémentaires et il n'y a plus lieu ni de les opposer, ni de les mettre en concurrence.

En revanche, la multiplicité des structures rend le dispositif actuel insuffisamment visible, au plan national et a fortiori aux niveaux européen et international.

Au plan scientifique, les propositions suivantes ont été formulées :

- structurer en réseau les ORE/SO existants qui sont relatifs à la thématique « hydrologie et cycles biogéochimiques associés » autour de problématiques génériques ;
- doter les ORE/SO de moyens d'expérimentation et d'observation en écologie ;
- fédérer les ZA constituées autour des corridors et des grands systèmes fluviaux et mettre en place un réseau autour du thème « modes d'occupation des terres, gestion des paysages et biodiversité » ;
- consolider les dispositifs sur les systèmes d'interfaces littorales ;
- investir les systèmes et milieux urbanisés (urbains et péri urbains) ;
- concrétiser l'idée de constitution d'observatoires « Hommes & Milieux » autour des impacts environnementaux et sociaux de perturbations/crises économiques ;

Observation et expérimentation : méthodes et outils

- savoir aussi remettre en cause les dispositifs, en fonction des évolutions scientifiques et/ou des nouveaux besoins opérationnels, tels les services GMES pour le suivi de l'application des politiques publiques d'adaptation aux changements globaux.

Au plan structurel, sans un cahier des charges contraignant et une évaluation scientifique rigoureuse, le risque de foisonnement d'initiatives anarchiques ne peut être négligé. Aussi, est-il urgent que les Organismes de tutelle mettent en place (par exemple au sein du Comité InterOrganisme – Environnement) un cadre et un mode de gouvernance bien précis pour chacun de ces outils, qui conduisent à une forme de contractualisation garantissant une récurrence des financements et une permanence des moyens humains.

■ Les plates-formes expérimentales communautaires

● Les plates-formes d'écologie expérimentale

Parmi les outils novateurs susceptibles de soutenir le développement de la recherche dans le domaine des SIC mais aussi en océanographie, aux cotés des dispositifs d'observation et des plates-formes analytiques, il est nécessaire 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 du milieu naturel (biotique ou abiotique) aux perturbations environnementales. Présents et largement utilisés en Amérique et en Europe du Nord, ces moyens sont encore à l'état embryonnaire en France.

Face aux besoins de la communauté française, plusieurs initiatives dans ce domaine ont récemment vu le jour. La description et l'état d'avancement des projets des principaux écotrons identifiés et présentés lors du colloque de Strasbourg sont rappelés en annexe.

De par leurs spécificités thématiques et techniques, ces écotrons constituent des dispositifs complémentaires, pouvant accueillir des projets dans les domaines terrestres, marins, côtiers et lacustres. Ils permettent à la fois de travailler sur des supports de taille variable (du microcosme au macrocosme), d'imposer de façon séparée ou combinée des forçages de différentes natures (atmosphériques, climatiques, chimiques,

biologiques...) et de mesurer à haute fréquence et de façon reproductive les réponses de systèmes écologiques de différentes dimensions et complexités. Selon les questions posées, les réponses mesurées peuvent concerner de très nombreuses variables d'état des systèmes considérés, des processus ou encore des interactions entre composantes du système.

Les questions posées peuvent être d'ordre fondamental et concerner l'acquisition de connaissances sur des processus ou leur paramétrisation, très difficile ou impossible à obtenir par des études *in situ*. Les champs thématiques correspondants sont très diversifiés et incluent notamment ceux de la modélisation des processus biologiques et géochimiques, depuis l'élaboration des modèles jusqu'à leur validation. On peut aussi envisager de développer des systèmes expérimentaux contrôlés reproduisant des continuums écologiques, comme ceux allant des écosystèmes continentaux aux écosystèmes marins côtiers, afin d'aborder la mesure des réponses d'écosystèmes différents aux mêmes contraintes d'origine anthropique.

Ces outils peuvent être aussi utilisés dans des domaines plus finalisés, comme la démonstration en a été faite en limnologie pour la mesure des effets des composés toxiques sur les organismes vivants. Ils peuvent également servir de support à des développements méthodologiques, en tant qu'environnement de mise au point et d'essai de différents capteurs et méthodes analytiques.

Ces dispositifs sont/seront ouverts aux communautés nationales et internationales et leurs modes de financement et de gestion devront assurer la continuité et l'adaptabilité des facilités expérimentales offertes et la qualité de l'archivage et de la mise à disposition des données.

Les activités d'observation et d'expérimentation sur les surfaces et interfaces continentales sont actuellement conduites, pour l'essentiel, à partir d'une grande variété de dispositifs de mesure distribués dans l'espace, avec ou sans intervention sur les facteurs environnementaux. La capacité de ces dispositifs à répondre au double besoin de compréhension des processus à différents niveaux d'intégration de la complexité (prise en compte des interactions et rétroactions biotiques-abiotiques, processus « naturels » et rétroactions sociétales par exemple) et de la variabilité spatio-temporelle dépend de leur organisation en un système d'observation cohérent. Fédérer l'ensemble de ces dispositifs (ORE/SO, ZA, plates-formes expérimentales) en

un « Système National d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche sur les Surfaces et Interfaces Continentales (OER-SIC) », s'interfaçant avec des systèmes étrangers de même nature ou similaires (e.g. LTER et plates-formes européennes), constitue un enjeu majeur pouvant relever d'une inscription à la « feuille de route » nationale des Très Grandes Infrastructures (TGI).

Les objectifs essentiels d'un tel système seraient :

- une standardisation aussi poussée que possible des observations, des méthodes de mesure, des stratégies d'échantillonnage et de la constitution, de l'archivage et de la mise à disposition des bases de données ;
- le développement et les tests de nouveaux capteurs et traceurs environnementaux ;
- une mise en commun des savoir-faire dans l'étude et la gestion des sites et plates-formes ;
- une synergie accrue dans le triptyque mesures-théories-modèles ;
- la valorisation de données communes par la modélisation (calibration, validation et assimilation de données) et l'échange de codes numériques ;
- une meilleure visibilité internationale des différents dispositifs français.

• Les plates-formes analytiques

La recherche dans le domaine des surfaces et interfaces continentales s'est accompagnée du développement d'outils analytiques de caractérisation des milieux. Cette évolution s'est faite à différents niveaux :

- par des très grands équipements (FAME, Synchrotron...) utilisés à des fins environnementales ;
- à l'aide d'équipements de taille moyenne développés dans différents laboratoires avec une vocation de mise en commun pour l'ensemble de la communauté ; les outils de type micro sonde, NanoSIMS et le développement de plates-formes génomiques en sont des exemples ;
- et par des plates-formes de taille plus réduite, de type ICP-MS, ICP-MS-MC ou spectromètres, pour la caractérisation essentiellement géochimique, qui sont en général mutualisées (ou qui tendent à le devenir) à l'échelle d'un OSU, d'une Fédération ou d'Institut Fédératif de Recherche.

Faisant suite à une recommandation de l'atelier « Écotoxicologie et écodynamique des contaminants », un inventaire non exhaustif de quelques outils et plates-formes disponibles au plan national ou régional afin de mieux utiliser et mutualiser les moyens correspondants est présenté ci-dessous.

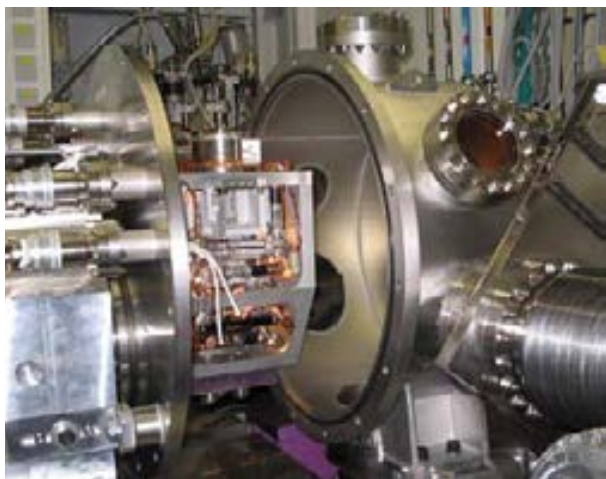


Figure 2.
Monochromateur RX de la ligne FAME. © FAME/INSU, Olivier Proux



Figure 3.
Détecteur de fluorescence X (à 30 éléments). © FAME/INSU, Olivier Proux

Cette ligne de lumière permet de réaliser des analyses de spectroscopie d'absorption X (EXAFS, XANES) associant des tailles de faisceau pouvant varier de 200 μm à 5 μm . L'avantage de cette technique est d'être spécifique à un élément au sein d'une matrice complexe, de ne nécessiter que peu ou pas de conditionnement d'échantillons. Il est ainsi possible de déterminer la spéciation ou la structure d'un élément se trouvant en quantité très faible dans un échantillon. Un article de vulgarisation a été consacré à cet outil dans le Journal du CNRS (<http://www2.cnrs.fr/presse/journal/1966.htm>). Les performances de cette ligne tiennent pour beaucoup à son détecteur pour l'instant unique en Europe.

Observation et expérimentation : méthodes et outils

Dans la problématique des micropolluants (organiques et inorganiques), l'accent doit être mis dans le futur sur le suivi, dans des matrices complexes, des contaminants, de leur spéciation ou de leurs métabolites et de leurs interactions. Comme l'a souligné l'atelier, l'étude de la dynamique réactionnelle aux interfaces solutions – minéraux ou solutions – matières organiques – organismes nécessite une approche à l'échelle moléculaire requérant un couplage de techniques analytiques modernes et générant une importante demande analytique.

L'utilisation d'outils dotés d'une résolution spatiale s'avère déterminante. Par exemple, la grande variété des outils spectroscopiques utilisant les rayons X avec une résolution latérale micro- voire nanométrique (microdiffraction des rayons X, microabsorption X, microfluorescence X, microtomographie, etc.) permet d'avoir accès à des informations essentielles sur la structure des phases nanocristallines et sur la forme chimique des éléments incorporés. Ces outils sont développés principalement sur des grands instruments nationaux. C'est ainsi le cas de la ligne de lumière FAME à l'ESRF (Figures 2 et 3) soutenue financièrement en grande partie par l'INSU et bien adaptée aux besoins de la communauté SIC. Le fait que cette communauté soit fortement représentée au sein des utilisateurs permet d'orienter les évolutions techniques

pour mieux répondre à ses problématiques. Dans le cadre de la formation permanente du CNRS, l'équipe scientifique de FAME a mis en place l'atelier FAME+ qui permet d'intégrer les développements les plus récents, tel un détecteur à haute résolution en énergie, plaçant la communauté française au meilleur niveau mondial.

D'autres outils de taille moyenne à vocation nationale utilisant des microfaisceaux ioniques, comme les sondes ioniques IMS 1270 du CRPG de Nancy (Figure 4) et NanoSIMS du Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris (Figure 5), sont disponibles pour la communauté. Même si les conditions d'analyse sous ultravide imposent des contraintes fortes sur les échantillons, la résolution spatiale de ces outils atteint des tailles de l'ordre de 50 nm. Outre les imageries chimiques, ces méthodes sont principalement adaptées à des analyses isotopiques avec des limites de détection extrêmement basses.

L'atelier « Écotoxicologie et écodynamique des contaminants » a également mis en évidence l'intérêt d'utiliser les isotopes afin de mieux tracer les polluants au sein des écosystèmes ainsi qu'au sein d'organismes vivants. Certains exemples présentés sur le site du MNHN (<http://www.mnhn.fr/leme/applications.htm>) montrent clairement la puissance de ces outils en ce qui concerne le fonctionnement de coraux (Figure 5).

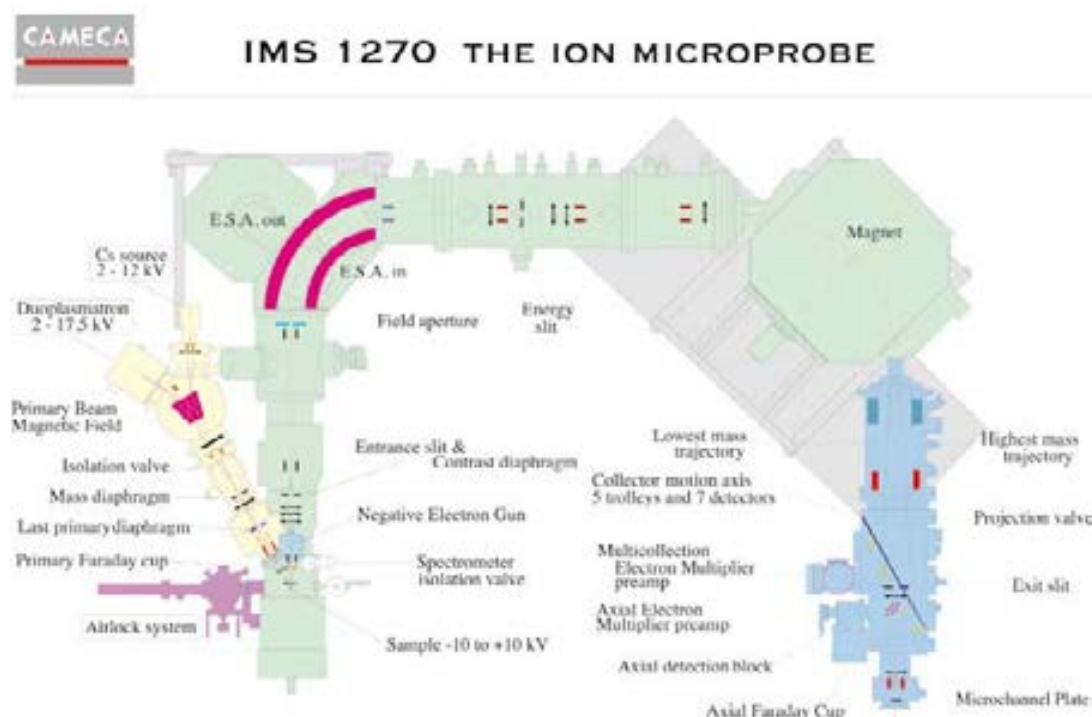


Figure 4.

Schéma de la sonde ionique IMS 1270 du CRPG. © CAMECA et CRPG/CNRS

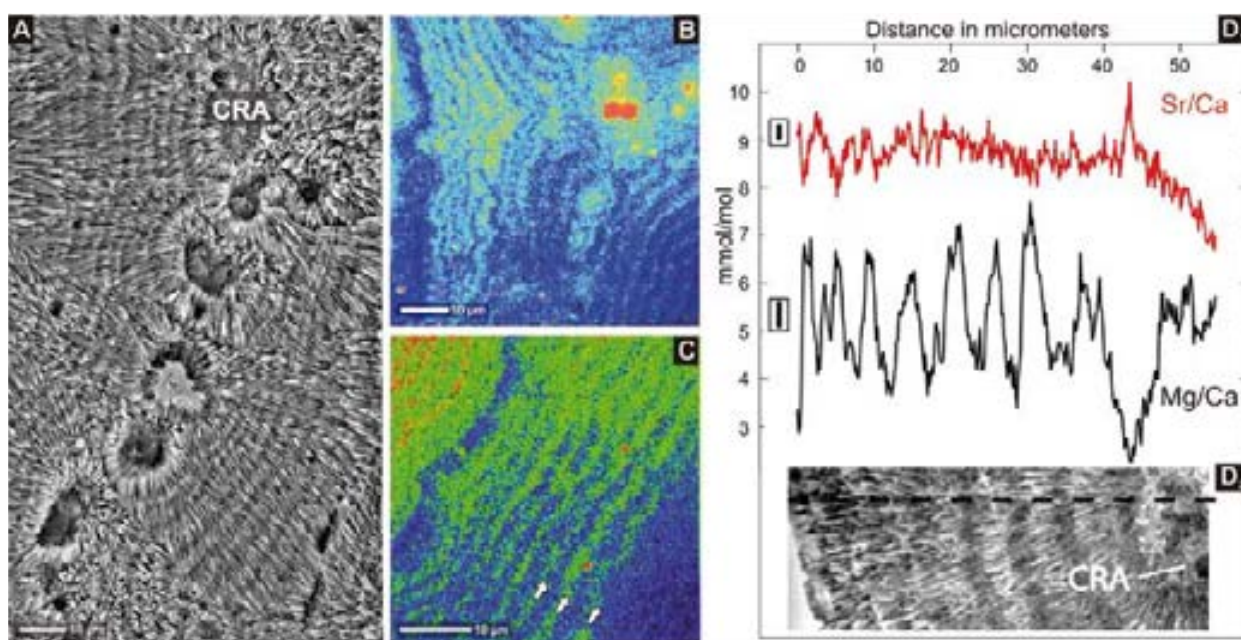


Figure 5.

Skeletal ultra-structure and associated trace-elemental vital effects in a *Porites* sp. zooxanthellate coral. A) SEM image of a lightly etched surface showing CRA and layered fibrous structures. B and C) Nano-SIMS maps of the Mg distribution (spatial resolution ca. 200nm) exhibiting a strong correlation with the fibrous layers in different parts of the skeleton. D) NanoSIMS linescans across layered fibrous skeleton revealing very large Mg/Ca and Sr/Ca vital effects. Etching of the coral surfaces always takes place after NanoSIMS imaging in order to modify the skeletal composition. From Meibom et al. GRL (2004) and Meibom et al. GRL (2007). Photo in A) courtesy of Prof. Stolarski.



Figure 6.

ASTER, l'accélérateur du Laboratoire National des Nucléides Cosmogéniques (CEREGE, Aix-en-Provence). © CEREGE, Georges Aumaitre

Il convient également de souligner la mise en place récente de l'Accélérateur pour les Sciences de la Terre, Environnement, Risques (ASTERisque) au CEREGE (Figure 6), outil national dédié à l'analyse des isotopes cosmogéniques. Même si une grande partie des applications concerne plutôt la géophysique, il existe des potentialités très intéressantes pour la communauté SIC qui mériteraient d'être explorées. Il en est de même de SOLEIL, qui associe le CNRS, le CEA et les collectivités territoriales (Île-de-France, Conseil Général de l'Essonne, Région Centre).

Concernant la dynamique des micropolluants inorganiques (métaux et métalloïdes), l'un des verrous identifiés est la difficulté liée au transfert d'échelles entre les approches moléculaires (e.g. au niveau des interfaces) et macro/mégascopiques (e.g. échantillon, colonne, profil de sols et de sédiments). Dans cette optique, le Pôle Méditerranéen des Sciences de l'Environnement de l'Arbois a mis en place une plate-forme constituée d'un ensemble d'outils (scanner RX, spectro-microscope RX-HORIBA XGT 5000 et appareil de

Observation et expérimentation : méthodes et outils

microdiffraction RX) permettant de réaliser des radiographies et des profils élémentaires sur des objets de différentes tailles (métrique à millimétrique) avec des résolutions allant de 200 à 10 μm (Figure 7). Le couplage de ces trois outils représente une réelle avancée car ils sont d'utilisation simple et pour l'essentiel non destructifs. Sans se substituer aux lignes développées sur synchrotron, cette plate-forme apporte des informations complémentaires à une échelle d'observation pouvant aller jusqu'au mètre, généralement peu pertinente sur synchrotron.

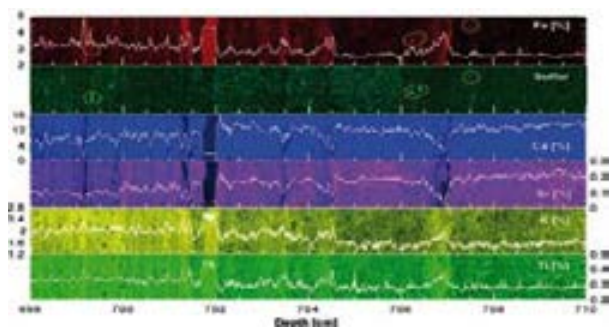


Figure 7.

Profils élémentaires d'une carotte de sédiments réalisés grâce à la plate-forme imagerie X du Pôle Méditerranéen des Sciences de l'Environnement.

Cependant, les plates-formes analytiques ne sont pas nécessaires uniquement pour des outils ayant une résolution spatiale. En effet, le développement récent de méthodes couplées (séparatives et analytiques) permet également la détermination de nombreuses formes chimiques des métaux et donc de contribuer à une compréhension plus précise de leur impact et de leur transfert dans l'écosystème, à l'instar par exemple des développements technologiques réalisés au LCABIE de Pau portant notamment sur un séparateur innovant et sur l'ablation laser femto seconde.

Au-delà de ces quelques exemples, d'autres projets sont actuellement en cours de réalisation comme les plates-formes MOME (MicrOrganismes en Milieux Extrêmes) et PMPN (Milieux Poreux Naturels) du GIS Envirhônalp. Ce type d'initiative est certainement à étendre, dans la mesure où les besoins analytiques vont augmenter de façon drastique ces prochaines années avec la nécessité d'étudier les réponses biologiques aux impacts des contaminants dans l'environnement.

Il est également indispensable de rappeler, au sein de l'ensemble du dispositif des plates-formes analytiques, le rôle important des services d'observation et d'expérimentation décrits par ailleurs dans ce document. Outre les aspects d'observation

intrinsèques à ces dispositifs, ils jouent un rôle fondamental d'expérimentation et constituent de fait des plates-formes expérimentales qui permettent souvent de travailler sur le lien entre l'observation à l'échelle du terrain et l'observation en laboratoire.

• Les plates-formes de génomique environnementale

Le développement d'analyses ADN, ARN ou protéines à l'échelle de génomes entiers a permis l'émergence de questions scientifiques nouvelles sur les interactions génétiques, les relations entre génotype et phénotype, le fonctionnement coordonné des génomes, la dynamique et la plasticité des génomes ou encore le fonctionnement d'écosystèmes. En effet, avec ces analyses, nous sommes encore plus proches d'une compréhension globale des activités fonctionnelles liées à la diversité des organismes d'un écosystème, notamment des microorganismes, grâce au développement considérable, ces quinze dernières années (Figure 8), de l'utilisation de séquences génétiques comme marqueurs de biodiversité et de structure des populations dans les écosystèmes.

De plus, c'est au niveau des génomes que sont inscrites les capacités adaptatives et les caractéristiques physiologiques des organismes, ce qui rend essentiel le développement d'une génomique comparative et fonctionnelle faisant le lien entre biodiversité et activités biologiques. La combinaison des approches de génomique et des sciences de l'environnement doit donc permettre d'appréhender la complexité de la biodiversité structurale et fonctionnelle et d'explorer de vastes domaines de recherche situés à l'interface entre biologie et écologie.

Les approches génomiques en sciences de l'environnement présentent des spécificités importantes par rapport aux approches génomiques classiques telles qu'elles ont été développées dans les sciences de la santé et de l'agriculture. Celles-ci sont en effet souvent fondées sur l'utilisation d'organismes modèles choisis pour leur intérêt médical, agricole ou leur facilité de culture, mais qui ne sont généralement pas représentatifs du milieu naturel ou, au mieux, n'en représentent qu'une infime partie. Une vision intégrative de la complexité des milieux et de la biodiversité est donc nécessaire pour limiter les biais d'interprétation des phénomènes écologiques observés. Elle implique l'étude d'organismes inconnus, rares, non cultivables ou ne pouvant être élevés en conditions contrôlées.

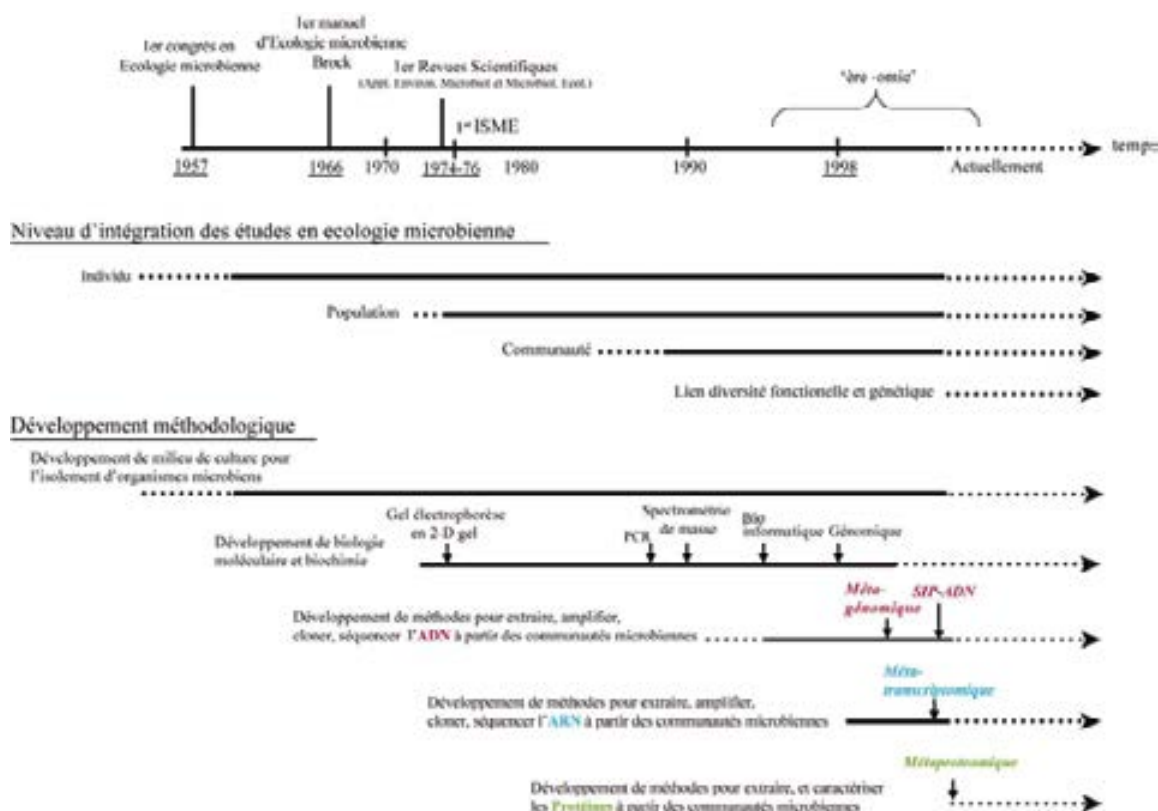


Figure 8.

Historique et évolution de l'écologie microbienne (issu de Maron et al., 2007).

Toutes ces spécificités ont fait émerger le concept de Génomique Environnementale.

Cette discipline peut apporter une contribution très significative à la compréhension du fonctionnement des écosystèmes, notamment en ce qui concerne les compartiments aux interfaces ou l'incidence de variables de forçage (modifications environnementales, variables géochimiques) sur la biodiversité. Ce nouveau champ thématique replace les fonctions des génomes, leur plasticité et leurs interactions, dans une perspective écologique qui devrait aussi se combiner avec de nouvelles approches de modélisation.

La révolution récente de la génomique est liée à l'apparition sur le marché de séquenceurs de nouvelle génération s'appuyant sur une chimie de séquençage radicalement différente des méthodes traditionnelles de Sanger et sur de nouveaux équipements permettant un débit d'analyse inégalé avec un nombre d'opérateurs et un coût très réduits.

Il semble judicieux et nécessaire que des investissements dans un équipement de séquençage de nouvelle génération (séquenceur de masse ou pyroséquenceur) soient réalisés

pour ne pas manquer le virage de la « démocratisation » du séquençage de génomes entiers, de la métagénomique, de la métatranscriptomique, des travaux qui inévitablement nourriront aussi la métaprotéomique. Ce type d'outil alimentera toute une gamme de questions visant, dans un contexte de travaux pluridisciplinaires (écologie, géologie, hydrologie, statistique, modélisation...) de nature fondamentale et/ou appliquée, à mieux comprendre les écosystèmes dans le contexte actuel du développement durable. À titre d'exemple, on trouvera en annexe, la plate-forme en cours d'acquisition à Rennes par les IFR CAREN et GFAS et qui constituera un complément à celle de Génomique Ouest.

Toutefois, l'implantation de tels équipements doit être coordonnée de façon à utiliser les ressources existantes tel le Génoscope, via la mise en place d'un accord cadre entre l'INSU-SIC et EDD, et à favoriser la mise en place de plates-formes mutualisées de séquençage à haut débit.

Enfin, rappelons que si l'accès à la donnée ne paraît plus être la contrainte majeure des approches dites de « omiques », c'est son traitement, et de ce fait le développement de la bioinformatique et des mathématiques associées, qui deviendra le verrou de cette approche.

■ Les outils et capteurs environnementaux

Les développements méthodologiques et instrumentaux et l'utilisation de capteurs environnementaux sont indissociables des activités d'observation, d'expérimentation et de modélisation, à toutes les échelles des systèmes et milieux continentaux concernés. Quelques exemples sont présentés ci-dessous, pour la géochimie, la géophysique et la télédétection spatiale, assortis de recommandations pour lever certains verrous.

● La géochimie

Pour la communauté des géochimistes et des biogéochimistes, des organiciens, des écophysiolgistes et des écologues, des hydrodynamiciens et des hydrologues, la connaissance des liens entre les processus écosystémiques et biogéochimiques, la diversité du vivant et les paramètres environnementaux et ce, des surfaces continentales jusqu'aux interfaces entre le continent et l'océan, est fondamentale. Cette démarche scientifique passe nécessairement par l'acquisition de données représentatives et fiables, permettant l'élaboration de modèles robustes, afin de documenter de manière aussi fine que possible l'évolution 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 variables et paramètres impliqués dans le contrôle des fonctions essentielles de ces milieux à différentes échelles, d'évaluer l'importance relative des différents processus, de borner leur variabilité spatio-temporelle et enfin de mesurer les flux élémentaires aux interfaces.

Il s'agit là de tenir compte, au sein des mésocosmes et macrocosmes, des contraintes internes (i.e. hétérogénéité texturale, structurale, variabilité fonctionnelle de la biodiversité...) et externes (e.g. climat, gestion et usages divers).

Les analyses *in situ* doivent permettre la réalisation d'expérimentations *ex situ* conduisant à l'élaboration de modèles mécanistes ou statistiques et à l'établissement de diagnostics pour une gestion durable.

Les simulations devront être effectuées sur des échantillons naturels non remaniés et le moins perturbés possible par l'instrumentation : les impacts des changements climatiques sur les hydro-écosystèmes et des politiques environnementales sur la gestion et la restauration des ressources pourront ainsi être évalués avec plus de précision.

Parmi les différents verrous méthodologiques identifiés, on retiendra plus particulièrement :

- l'identification des processus et des mécanismes fondamentaux (e.g. 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 transfert et détection des phénomènes émergents) ;
- le couplage avec des méthodes d'analyse déportée (e.g. biologie moléculaire, imagerie multidimensionnelle ou hyperspectrale, biosenseurs et capteurs électrochimiques) ;
- le développement d'une véritable méthodologie d'analyse multicritère en milieu complexe, tenant compte des concordances analytiques entre anciennes et nouvelles méthodes.

Par ailleurs, il est indispensable de regrouper des compétences, notamment autour de pôles, pour développer en synergie des capteurs géophysiques, géochimiques et biologiques, pour proposer des plateaux expérimentaux biophysicochimiques et les mesures associées à différentes échelles et pour promouvoir les approches couplées expérimentation-modélisation.

Il conviendra également d'exploiter au mieux le potentiel technique des plates-formes expérimentales et des plateaux technologiques, afin d'étudier les réponses du milieu naturel, biotique et abiotique, aux perturbations environnementales. Plusieurs de ces dispositifs sont déjà fonctionnels, comme MEDIMEER (voir annexe) ou les parcelles lysimétriques du GIS « Fiches Industrielles » d'Homécourt dédiées à l'analyse *in situ* de l'écodynamique des polluants métalliques et organiques pour la restauration et le traitement des sols pollués. D'autres sont en cours de développement, comme l'Écotron montpelliérain, les Écolabs et les Bassins Aquatiques de Foljuif (voir annexe) ou encore ceux relatifs aux écosystèmes alpins du Lautaret et aux plateaux technologiques du GIS Envrhônalp.

Enfin, un effort important devra être consacré au stockage, à l'archivage, au traitement et à la gestion des données.

• La géophysique

Les surfaces et interfaces continentales sont caractérisées par une très forte hétérogénéité physicochimique, géologique ou pédologique et biologique. Cette variabilité spatiale implique de fortes contraintes sur les possibilités de mise en œuvre des nombreuses techniques géophysiques ainsi que sur leur capacité à produire des mesures pertinentes. Un des enjeux consiste à banaliser l'utilisation d'outils, et surtout à les rendre opérationnels pour la caractérisation des SIC et le suivi des problèmes environnementaux, et à adapter les outils existants ou à venir aux problématiques pertinentes.

L'essor tant technologique qu'informatique rend de nombreuses attentes possibles. Des techniques autrefois lentes deviennent réalisables avec de hautes cadences de répétition, et de très gros jeux de données peuvent être traités et visualisés dans des délais raisonnables. L'effort porté sur les algorithmes permet le traitement et l'inversion conjointe de jeux de données hétérogènes.

La zone non saturée, intermédiaire obligé quant aux transferts entre la surface et la zone saturée, est souvent mal définie. De nombreuses lois de comportement y trouvent leurs limites. Le milieu est difficilement modélisable de manière numérique. Le nombre important de variables rend également délicate la moindre étude de sensibilité. La transformation des mesurables géophysiques (résistivité, vitesse sismique, permittivité électrique, viscosité magnétique, coefficient de couplages...) en des paramètres plus utilisables de description du sol (porosité, perméabilité, taux d'argile, etc.) n'a cependant jamais autant interpellé et mobilisé les acteurs impliqués.

Il existe un consensus (point commun entre les différentes communautés de « mesureurs », tant géophysiciens que géochimistes ou biologistes) sur la nécessité d'acquérir des mesures à hautes définitions, spatiale et temporelle, avec un échantillonnage pertinent. Actuellement, la cartographie de paramètres géophysiques au-delà de l'échelle locale se heurte à des verrous techniques. Par exemple, la détermination de la teneur en eau sur les premiers décimètres d'un sol de quelques hectares est partagée entre des mesures très locales (TDR, tensiomètres...), la mesure rapide de la résistivité électrique à différentes profondeurs d'investigation (par dispositifs tractés) et des mesures plus intégratives (radar-sol, radar aéroporté type SAR, thermographie infrarouge souvent limitée à la frange capillaire). Le développement de nouvelles méthodes, tel

l'ÉlectroMagnétisme aux Fréquences Intermédiaires, apparaît nécessaire pour atteindre cet objectif.

L'identification et la caractérisation des flux hydriques dans le sous-sol restent également problématiques. Des méthodes identifiées comme pertinentes sont le potentiel spontané et la mesure de température. Néanmoins, elles font face à un verrou technologique puisqu'elles nécessitent des capteurs résistants permettant des mesures *in situ* avec une précision qui doit atteindre le 1/1000°C pour le suivi de phénomènes diurnes. Une approche alternative est le suivi temporel de mesures, par exemple la résistivité, dont le traitement couplera astucieusement inversion et assimilation de données.

La biogéophysique est une discipline émergente (surtout en Amérique du Nord), issue de la géophysique appliquée, qui vise à la détection, la surveillance et la caractérisation de l'activité biologique de la sub-surface. Elle ouvre des perspectives intéressantes pour l'étude des propriétés des bactéries et de leur interaction avec le milieu géologique et pour la caractérisation directe ou indirecte des signatures géophysiques propres aux processus microbiens et à des applications environnementales telles que les conséquences de pollutions diverses ou de leur remédiation. La résistivité complexe y trouvera ici probablement son application phare. Le défi réside dans la nécessité de développer des collaborations entre biologistes et géophysiciens, collaborations qui ont néanmoins déjà fonctionné s'agissant notamment des géobactéries.

La compréhension objective de nombreux signaux géophysiques reste encore fragmentaire. La calibration par des mesures en mésocosmes représentatifs, physiquement et hydrauliquement, des conditions *in situ* a connu des progrès remarquables. Cependant, la difficulté de discriminer les nombreux effets agissant simultanément, ainsi que leurs variations temporelles, freinent trop souvent la qualité de l'interprétation pour les raisons essentielles suivantes :

- les signaux de potentiel spontané sont par essence compliqués à analyser, compte tenu de la superposition des effets électrocinétiques, redox, géochimiques ou biologiques ;
- la résistivité complexe, expression mathématique des phénomènes de polarisation provoquée, est encore trop méconnue en France, tant au niveau de l'échantillon de laboratoire qu'à l'échelle du terrain ; l'équipement permettant de réaliser des mesures relevant des problématiques SIC n'est pas totalement fiabilisé ; les

mesures *in situ* souffrent de la difficulté à séparer les effets de polarisation des effets électromagnétiques, avec un couplage dépendant fortement du modèle utilisé ;

- la résonance magnétique protonique appliquée en surface (RMP) est l'une des seules méthodes directes de détection de la quantité d'eau libre présente dans le sous-sol ; ses limites actuelles résident dans la détection de l'eau de constitution et dans sa faible performance dans la zone non saturée ; un effort est donc à mener pour réduire ces biais.

L'acquisition sur des superficies importantes devrait impliquer l'introduction des méthodes aéroportées. L'application des méthodes électromagnétiques, notamment héliportées, tant fréquentielles que temporelles, est un atout important pour la caractérisation hydrogéophysique du sous-sol, aspect qui n'est que très peu développé en France par rapport à d'autres pays européens (e.g. Allemagne, Danemark et Espagne). Une réflexion doit donc être menée afin de mutualiser et d'optimiser l'emploi de tels équipements, avec une logique communautaire. Cette réflexion doit pouvoir inclure d'autres équipements émergents comme le lidar dont l'apport pour la connaissance et la spatialisation de la topographie fine est indéniable depuis les larges plaines alluviales jusqu'aux environnements côtiers. Le suivi temporel aux fins de surveillance nécessite une répétition de l'acquisition qui implique un équipement ou un financement pérenne.

Enfin, la compréhension, la mesure et le traitement aux interfaces sol – biosphère continentale – atmosphère dépendent de la capacité de la communauté à développer des modèles plus intégratifs, utilisables aussi bien pour l'étude des processus que pour l'établissement de critères et d'indicateurs de gestion des espaces naturels et anthropisés.

• La télédétection et les 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 notamment 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 également le cas des changements globaux largement explicités par les modes de couverture et d'utilisation des terres dont on peut évaluer les impacts sur les variables d'état des surfaces.

La télédétection spatiale prend une place de plus en plus

importante dans les dispositifs d'observation, de compréhension et de modélisation des états des surfaces continentales et des processus auxquelles elles sont liées. Au-delà des résultats de plus en plus significatifs, voire spectaculaires, obtenus ces dernières années et des lourds programmes européens et internationaux en cours de montage, la télédétection spatiale reste encore insuffisamment utilisée par la communauté SIC au regard des potentialités scientifiques qu'elle offre et des enjeux qu'elle représente en termes de gestion des ressources, des risques et des crises, de protection de l'environnement et d'aménagement des territoires.

La variété des capteurs utilisables pousse d'abord à mieux exploiter les missions opérationnelles et à insister sur la nécessaire continuité des missions scientifiques. Il s'agit en particulier de poursuivre le développement de capteurs à résolution spatiale et répétitivité temporelle élevées. Il serait utile de relancer la réflexion sur l'hyperspectral, l'infrarouge thermique et le lidar satellitaire. Dans l'immédiat, il est important de soutenir le passage en phase active de missions de préparation telles que BIOMASSE, EnMAP, FLEX, ORFEO, VENμS...

Il serait également très souhaitable de faciliter l'accès aux moyens aéroportés (UMS SAFIRE, drones, ULM...) pour un usage plus intensif et répétitif de caméras (optique, thermique...), de lidars (pour l'altimétrie, la description des rugosités et des objets des paysages...) et de gammamètres (pour les propriétés des premiers mètres de sol).

Au plan méthodologique, il s'agit d'abord de « donner du sens au signal » pour accéder aux propriétés de la surface en :

- définissant des indicateurs innovants et fiables pour la caractérisation des paysages, la détection des changements sur le court et le long termes, l'analyse de la vulnérabilité des milieux...
- améliorant l'inversion du signal en variables biophysiques par les modèles de transfert radiatif (notamment 3D de la structure du couvert et de sa dynamique temporelle) et les méthodes d'inversion, au travers de l'utilisation d'informations exogènes et de contraintes spatiales et temporelles et du recours à des domaines variés de longueurs d'onde permettant l'interprétation de signaux complexes comme ceux issus du sol ;
- assurant les complémentarités nécessaires dans les analyses des milieux fortement imbriqués comme le continental et le côtier, le rural et l'urbain ;
- établissant des passerelles avec la communauté ST liée à l'observation de la Terre (hydrogéodésie, risques naturels, mouvements de terrains...).

Il s'agit ensuite d'améliorer la prise en compte de données spatiales dans les modèles de surface, en approfondissant les liens entre variables accessibles et variables des modèles de fonctionnement, en progressant dans les méthodes d'agrégation et de désagrégation et en développant les techniques d'assimilation de données et de traitement des incertitudes.

Il convient également de faciliter l'utilisation des données spatiales par la communauté SIC, de progresser dans la mutualisation des compétences et des outils et de développer l'animation scientifique et les actions de formation. Il est tout aussi indispensable de répondre aux différents niveaux de besoins exprimés par cette communauté dans les domaines du pré traitement des données (calibration, corrections géométriques et atmosphériques) sur de longues séries hétérogènes, de la production de produits courants et de méthodes et produits plus élaborés conçus dans des Pôles thématiques associés à des Centres de compétences et à des Sites de référence en observation au sol et depuis l'espace.

Moins que toute autre, la recherche en télédétection spatiale ne peut progresser sans des liens forts avec la communauté « spatiale » internationale et surtout européenne. Il est essentiel que la communauté française s'inscrive résolument dans cette démarche au niveau du 7e PCRD avec la conception de produits biophysiques et la participation à des « core » et « downstream services » GMES, ainsi qu'à des programmes de type ERA-NET.

■ La recherche et développement (R&D)

• Le contexte

Selon le manuel de Frascati (2002) établi par l'OCDE, la R&D englobe les travaux de création entrepris de façon systématique en vue d'accroître la somme des connaissances, y comprise la connaissance de l'homme, de la culture et de la société, ainsi que l'utilisation de celle-ci pour de nouvelles applications. Tel que défini, le terme de R&D recouvre des activités de recherches fondamentales et finalisées, de développements expérimentaux et instrumentaux et d'innovations matérielles et immatérielles.

Dans ce contexte et sur le plan métrologique, différentes situations peuvent être rencontrées : des capteurs/instruments sont disponibles sur le marché mais ils ne sont pas optimaux pour les besoins de la recherche et/ou ne couvrent pas toutes

les échelles d'intérêt ; bien que disponibles, leur acquisition peut être rendue difficile par des problèmes de coût, de contraintes réglementaires d'utilisation ou plus simplement par une offre industrielle/commerciale déficiente ; la solution technique d'un problème métrologique spécifique peut ne pas avoir été développée.

Pour améliorer cette situation, il convient certes de poursuivre l'effort de recherche tel qu'il a été soutenu ces dernières années dans le cadre de programmes nationaux multiorganismes (dont certains comme ECCO et EC2CO affichent dans leurs priorités des développements instrumentaux). Cependant, cela ne semble pas suffisant pour au moins deux raisons :

- il est difficile de faire cohabiter dans un même projet une problématique à caractère métrologique et un objectif de recherche plus vaste lié au développement de la dite métrologie ;
- lorsqu'un capteur, un instrument ou une méthodologie de mesure est le résultat d'un projet de recherche, une phase complémentaire de R&D apparaît bien souvent nécessaire pour permettre sa diffusion au sein de la communauté concernée.

• Les besoins en capteurs et instruments

La synthèse de la prospective des différents ateliers souligne l'importance d'une démarche proactive en R&D instrumentale. Quelques exemples de pistes de progrès possibles et de besoins nouveaux dans les principaux domaines concernés par la communauté sont présentés ci-dessous.

En hydrométéorologie

- améliorer les techniques d'estimation des précipitations par radar et le développement d'algorithmes optimaux de traitement des données ;
- fiabiliser les spectro-pluviomètres optiques pour la caractérisation fine de la pluie au sol (granulométrie, intensité, énergie cinétique) ;
- développer la scintillométrie micro-onde pour la mesure directe des flux de chaleur latente à l'échelle kilométrique du paysage, en complément des tours à flux d'échelle plus locale.

En hydrométrie

- développer des approches « sans contact » (e.g. PIV/LSPIV- Particle Image Velocimetry/Large Scale Particle Image Velocimetry, cinémomètre radar et hydrophone) pour la mesure automatique, continue et tout temps, des hauteurs d'eau et des débits (liquides et solides) des écoulements à surface libre.

En hydrogéophysique

- poursuivre le développement de méthodes non invasives du suivi temporel de l'humidité des sols (sondes capacitives, réflectométrie temporelle, géoradar, radar basse fréquence, radiométrie, résonance magnétique protonique) et de la vapeur d'eau atmosphérique (GPS), en liaison notamment avec les missions spatiales (e.g. SMOS) et la surveillance de l'environnement (ORE, SO, initiative GMES, etc.) ;
- revisiter l'hydrodynamique des forages à l'aide de méthodes géophysiques (PS, vélocimétrie Doppler) et chimiques (traçages).

En biogéochimie

- poursuivre le développement des mesures rapides (10 Hz) par diode laser des isotopes du CO₂ (¹³C, ¹⁸O) et de la vapeur d'eau (¹⁸O, ²H) atmosphériques ; associées aux analyses isotopiques réalisées en routine sur des microéchantillons (eau, matière organique), ces mesures devraient conduire à une très nette amélioration de la compréhension des interactions au sein du continuum sol – plante – atmosphère, que ce soit au sein des écotrons ou en conditions naturelles ;
- développer de nouveaux outils / méthodes analytiques de mesure des rapports isotopiques ¹⁷O/¹⁶O, ¹⁸O/¹⁶O des sulfates et des nitrates d'une part et ³He/⁴He de l'atmosphère d'autre part permettant respectivement une vision renouvelée des processus de nitrification/dénitrification dans les sols et la quantification de certains termes du cycle du CO₂ (sources et puits) ;
- développer des réacteurs biogéochimiques, hydrodynamiquement actifs pour d'étude des couplages écoulement – transport – réaction dans les milieux poreux (continus, agrégés, fissurés ou facturés), des écotrons et des aquatrons ;
- développer des biocapteurs / techniques de biologie moléculaire pour la mesure *in situ* des faibles concentrations de substances chimiques potentiellement toxiques.

Plus généralement, il convient de développer et d'évaluer des indicateurs environnementaux (physiques, chimiques et biologiques) synthétisant de façon pertinente l'état des écosystèmes, leur dynamique d'évolution et leur vulnérabilité afin notamment d'alimenter le plus objectivement possible les débats sociétaux et institutionnels.

La prospective a également mis en avant la nécessité de pouvoir disposer de quelques sites pilotes à vocation nationale ou régionale, pour le test et l'évaluation des capteurs/instruments développés.

L'instrumentation (au même titre que la modélisation) joue un rôle important dans les recherches en environnement, mais selon les disciplines, son organisation et son développement sont plus ou moins bien structurés. À titre d'illustration, on peut citer l'existence de réseaux dédiés tels que :

- GEOFCAN (approche GEOphysique et structurale de l'organisation spatiale et du Fonctionnement des Couvertures pédologiques Anthropisées ou Naturelles) qui réunit des spécialistes du monde académique, des Instituts de recherche à caractère finalisé et des entreprises, intéressés au développement des méthodes de reconnaissance non destructive du sol et du proche sous-sol ;
- GFHN (Groupe Francophone Humidimétrie et traNsferTs en milieux poreux) qui tient des journées scientifiques annuelles, auxquelles assistent quelques représentants de PME, et constitue ainsi un lieu de rencontre pluridisciplinaire (agronomie, écologie, pédologie, hydrologie, physique / mécanique / chimie du sol) sur les processus de transfert-transport dans les sols et les matériaux et les métrologies associées ;
- les Ateliers expérimentation et instrumentation (AEI), organisés conjointement par l'INSU, l'Ifremer, Météo France, les centres de compétences du CNES et le Groupement de recherche « biocapteurs » d'Ifremer, dans lesquels la communauté SIC devrait être plus présente pour exprimer ses besoins et échanger savoir-faire et expertise technologique sans se limiter à un thème particulier.

De façon plus générale et en ce qui concerne le soutien aux actions de R&D, la CSSIC rejoint les recommandations formulées par la CSOA lors de son colloque de prospective de Lille :

- nécessité d'avoir une vision d'ensemble des rôles des laboratoires (qui restent bien souvent le lieu privilégié des développements instrumentaux) et de la Direction de l'INSU (voire de ses partenaires) afin de rationaliser les efforts ;

- favoriser la veille technologique en facilitant la circulation de l'information entre les départements du CNRS ;
- encourager le développement conjoint de capteurs ou l'adaptation de capteurs existants.

Un autre besoin, tout aussi clairement exprimé, est relatif à la conservation des métiers et savoir-faire, laquelle passe par l'identification des « laboratoires / personnes ressources » et l'assurance que les compétences peuvent y être maintenues.

■ Les flux et les bases de données

● Le contexte

Toutes les recherches multidisciplinaires mettent en jeu des flux d'informations de plus en plus importants, que ce soit au niveau des divers capteurs permettant le recueil d'observations sur le système considéré et son environnement ou au niveau des modèles plus ou moins complexes et détaillés utilisés pour simuler le comportement du système et ses interactions internes et externes. Or, le traitement de ces données dépend de leur mode d'obtention, chaque système d'acquisition posant des problèmes spécifiques, selon les paramètres considérés, leur hétérogénéité spatiale et/ou temporelle, la détection des données erronées et le traitement des données manquantes. Le fait que les études tendent de plus en plus à mettre en jeu des milieux diversifiés et à faire collaborer des domaines scientifiques différents est donc source de difficultés supplémentaires, liées à l'augmentation de la variété des systèmes d'acquisition mis en œuvre. Ces questions se retrouvent dans la plupart des disciplines, où elles sont traitées généralement au cas par cas par des techniques « ad hoc », mises au point souvent empiriquement en fonction des besoins, mais l'interdisciplinarité tend à les faire ressortir, voire à les exacerber, en raison de la multiplication des sources de données.

● Les priorités et les moyens à mettre en œuvre

Ces différents aspects doivent inciter au développement de méthodes plus générales, voire génériques, pour traiter l'hétérogénéité des réseaux de mesure ou de grilles de modèles et faire collaborer des disciplines aux domaines différents (océanographie, atmosphère, hydrologie, géophysique, biologie, écologie...).

L'évolution des moyens analytiques et d'observation *in situ* et depuis l'espace ainsi que l'augmentation de la puissance de calcul disponible pour la modélisation vont conduire à la poursuite de l'accroissement des flux de données dans les prochaines années. Il est donc indispensable de pouvoir traiter au mieux l'information produite et d'intensifier le développement et l'application de méthodes permettant leur analyse systématique. En particulier, les méthodes d'analyse multiéchelle sont particulièrement efficaces pour représenter de façon parcimonieuse les structures spatiales et/ou temporelles complexes comme le montrent leurs applications croissantes à de nombreux champs géophysiques. Elles devraient être plus systématiquement utilisées, ce qui nécessitera le développement conjoint de logiciels pour automatiser leur mise en œuvre de façon robuste et efficace, et la mise en place de formations sur les outils techniques correspondants.

Enfin, il est rappelé la nécessité d'archiver et de pérenniser les bases de données, qu'elles soient issues des systèmes d'observation, des expérimentations, des plates-formes expérimentales et analytiques ou des codes numériques, et de les rendre facilement accessibles à la communauté. Le développement de véritables Systèmes d'Informations Environnementales (SIE) est encouragé.

La modélisation

Le modèle et la modélisation sont très largement répandus pour décrire le fonctionnement des Surfaces et Interfaces Continentales. Par modèle, on entend une représentation souvent simplifiée et partielle des phénomènes observés. La modélisation désigne l'élaboration de cette représentation pour répondre à une question scientifique ou à des préoccupations opérationnelles. Les modèles peuvent être vus comme des intégrateurs de connaissances (rôle structurant de la démarche scientifique et donc révélateur de lacunes), des médiateurs disciplinaires, des simulateurs/prédicteurs des phénomènes et des comportements à différentes échelles spatiales et temporelles ou des outils d'aide à la décision et/ou à l'analyse des scénarii.

La variabilité des écosystèmes liée à leur hétérogénéité est telle qu'une description complète et détaillée de leur fonctionnement est aujourd'hui impossible. L'ensemble des mesures, qu'elles soient ponctuelles ou intégrales, ne fournit au mieux qu'une indication, sous réserve que ces mesures soient pertinentes pour le calage ou la validation du modèle retenu et en nombre suffisant pour un traitement statistique. De plus, face à un ensemble de sollicitations (forçages, conditions aux limites), les SIC fournissent une réponse unique, locale ou intégrative, qui ne permet pas d'identifier toute la variabilité de leur fonctionnement en l'absence d'une série suffisamment longue d'observations.

Par conséquent, la modélisation du fonctionnement des SIC et la prévision de leur évolution ne peuvent pas se contenter de produire des réponses « uniques » et doivent s'appuyer sur des approches probabilistes. Ce constat a deux conséquences :

- l'observation du système, le calage du modèle et les prévisions doivent s'accompagner d'une évaluation des erreurs liées à l'observation (capteurs, interpolations, spatialisation...), d'une analyse de la paramétrisation (unicité, optimalité, ensemble de solutions possibles...) et d'une estimation des incertitudes sur les sorties du modèle ;
- le nombre de mesures étant toujours insuffisant pour une description déterministe de ces systèmes complexes, il est alors difficile d'identifier et de réfuter des simulations inexactes ou fausses ; de plus, les observations ne fournissant qu'une seule réalisation, elles ne pourront pas contredire un modèle probabiliste (situation non poppérienne).

Afin de limiter l'ensemble des réponses possibles d'un modèle, il convient :

- de créer/améliorer des outils d'analyse de données (traitement statistique, traitement du signal...) pour identifier des tendances, des organisations internes ou des modes de fonctionnement ;
- d'améliorer la compréhension des processus élémentaires et proposer des modèles mécanistes permettant la description de ces phénomènes ;
- de développer/créer des outils de description du milieu (méthodes de changement d'échelles, identification de paramètres par approche inverse...);
- de développer/adapter/créer des méthodes permettant d'identifier et de propager les incertitudes, depuis les variables d'entrée et les paramètres du modèle jusqu'aux variables de sortie.

Les fonctions et objectifs de la modélisation peuvent se décliner de plusieurs manières. Celle retenue ici consiste à présenter les besoins en recherche par niveaux d'organisation hiérarchisés comprenant trois niveaux d'échelle : les processus élémentaires, les écosystèmes et les paysages. Cependant, étant donné le caractère très dynamique des surfaces continentales, les impacts environnementaux peuvent parfois se propager dans les deux sens aux différentes échelles d'organisation de la biosphère continentale : depuis les échelles locales où se produisent certaines des perturbations anthropiques vers les échelles globales, et réciproquement, à partir des échelles globales vers les niveaux d'organisation plus élémentaires.

La compréhension fine des mécanismes se fait à l'échelle des processus élémentaires. Cette compréhension repose sur des expérimentations spécifiques, menées sous conditions contrôlées (en laboratoire, sur plate-forme expérimentale...) et permettant de développer les connaissances sur des processus et leurs éventuels couplages.

L'échelle des écosystèmes peut être considérée comme une échelle intermédiaire, permettant de valider la pertinence des modélisations effectuées à une échelle plus fine, de se confronter aux conditions de terrain, en abordant notamment les problèmes de changement d'échelles, et d'évaluer le potentiel de prévision des modélisations. C'est le lieu d'expérimentations détaillées, conduisant à l'acquisition de

données nombreuses dans l'optique de valider un modèle ou une démarche de modélisation. Les ORE/SO sont des outils particulièrement adaptés à ce type de modélisation.

La dernière échelle, celle du paysage, de l'écorégion, est le lieu de la modélisation pour l'action. C'est le domaine de la mise en œuvre des modèles dans des conditions réelles et avec des objectifs plus finalisés de gestion des ressources écosystémiques et de recherche d'opérationnalité. Ce changement d'objectif peut soulever de nombreux problèmes de modélisation encore très insuffisamment abordés par la communauté.

■ La modélisation à l'échelle des processus élémentaires

Représentant une synthèse de nos connaissances, le modèle peut être considéré comme une mesure de notre savoir à un temps donné. Si des progrès remarquables ont été réalisés ces dernières années sur la modélisation d'un grand nombre de processus élémentaires, il reste de nombreux verrous, notamment au niveau des processus couplés (hydrodynamique – processus réactionnels par exemple) et des phénomènes aux interfaces (interactions eau – sol – plante...).

À cette échelle, il s'agira de développer des modèles essentiellement mécanistes pour décrire ces couplages et interactions. Il est nécessaire d'encourager la construction de modèles entre disciplines, concernant notamment :

- les interactions eau – sol – plante – atmosphère ;
- l'hydrodynamique couplé au transport et réactions biogéochimiques ;
- le transport solide ;
- le transport colloïdal.

De tels modèles sont importants, notamment pour évaluer les réponses des organismes vivants (individus) aux perturbations environnementales.

■ La modélisation à l'échelle des écosystèmes

Qu'ils soient terrestres ou aquatiques, les écosystèmes représentent le niveau d'organisation biophysicochimique où les organismes biologiques interagissent entre eux et avec leur environnement. Définis par des composantes physiques, chimiques et biologiques en interaction constante avec

l'atmosphère, ils possèdent une structure spatiale qu'il convient d'explicitier, afin de la relier à des propriétés fonctionnelles (flux de matière et d'énergie entre compartiments internes et vers le milieu extérieur, diversité fonctionnelle) et en comprendre ainsi la dynamique de fonctionnement et d'évolution (rétroactions entre fonctionnement et structure) en fonction des contraintes du milieu.

C'est au niveau des écosystèmes que les processus naturels élémentaires et leurs dynamiques, une fois connus, doivent être intégrés, hiérarchisés et couplés afin de produire des ensembles fonctionnels cohérents et de dégager les propriétés émergentes pertinentes de ces systèmes pour l'étude et l'analyse des impacts environnementaux des activités humaines à large échelle (Figure 9).

C'est aussi à ce niveau qu'apparaissent les notions d'organisation, de diversité, d'hétérogénéité et de variabilité dont la modélisation constitue un enjeu très important.

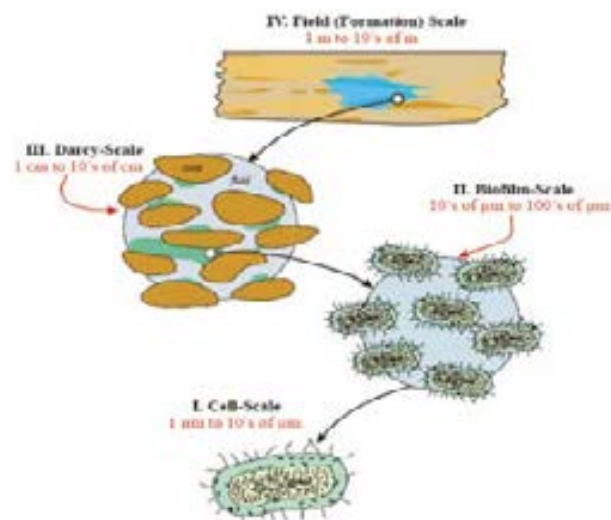


Figure 9.

Aspect multiéchelle : exemple d'un phénomène de bioremédiation *in situ* (Wood, B. D., M. Quintard, F. Golfier, and S. Whitaker. 2002. *Computational Methods in Water Resources*. Elsevier, Amsterdam, 1195-2002)

La modélisation

La modélisation du fonctionnement des écosystèmes se doit donc de résoudre deux problèmes majeurs :

- le changement d'échelle, qui concerne toutes les disciplines des SIC (qui ne manquent pas de le citer comme tel dans les différents ateliers), avec le passage individu-population et la détermination de paramètres équivalents ;
- le développement de méthodes permettant d'identifier et de représenter l'organisation, la diversité, l'hétérogénéité et la variabilité de tels systèmes.

Les techniques multiéchelles ont commencé à diffuser au sein de la communauté des SIC et ont ainsi changé pour une part leur cadre conceptuel qui devient de plus en plus un objet d'étude à part entière, plutôt qu'un simple rappel d'une difficulté à contourner. Il y a donc nécessité de continuer l'effort de recherche pour la généralisation de ces techniques (homogénéisation, prise de moyenne, anisotropie et saisonnalité).

Dans ce cadre, le développement de méthodes d'agrégation et de désagrégation pour pouvoir travailler à différentes échelles spatio-temporelles doit être encouragé, en intégrant notamment l'utilisation conjointe de modèles et de données obtenues à différentes échelles.

La représentation de l'organisation, de la diversité, de l'hétérogénéité et de la variabilité d'un écosystème reste une question scientifique très ouverte, essentiellement pour deux raisons : la nature très hétérogène des populations et des propriétés de transfert, transport et transformation posant le problème de leur émergence, et la quantité d'information disponible, souvent trop fragmentaire.

Trois voies principales sont à explorer :

- les approches inverses fondées sur des concepts bayésiens

Il convient d'encourager des recherches permettant l'intégration de données multiples (hydrologiques, géochimiques, géophysiques, obtenues par mesure *in situ* ou télédétection) ayant souvent des supports de mesure très différents. Il faut également soutenir des approches de paramétrisation automatique telles que les indicateurs de raffinement, les déformations graduelles ou les méthodes dites de lignes de niveaux (level set).

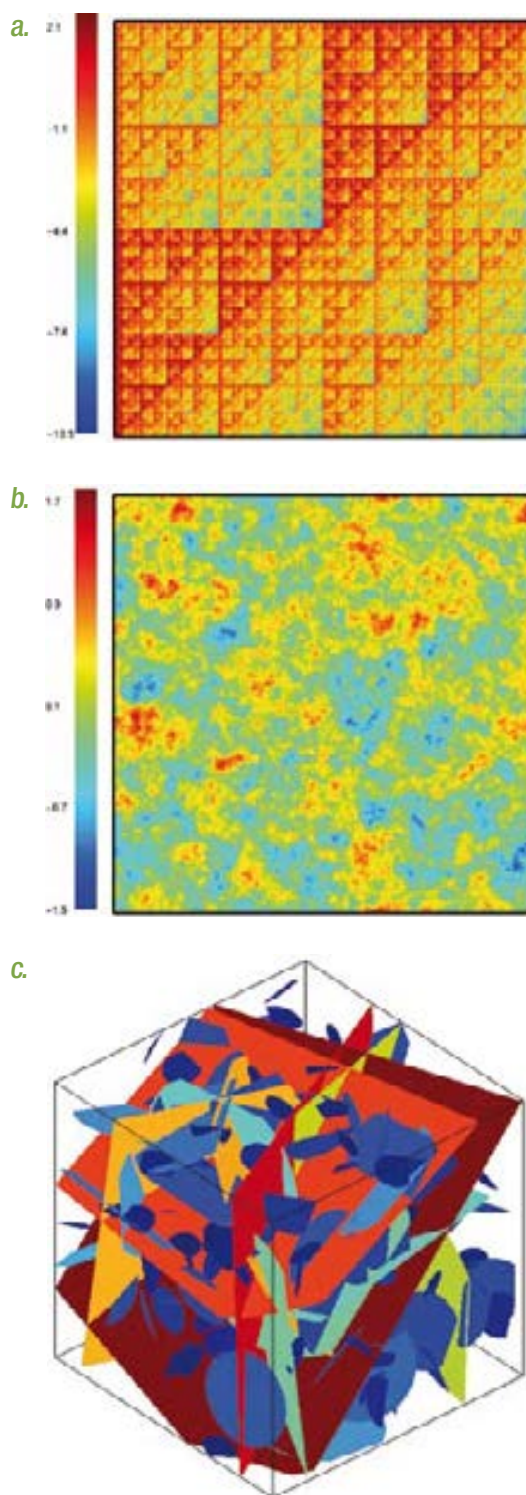


Figure 10.

Exemples de description d'un milieu souterrain : (a) déterministe et fractale (champ de perméabilité. © Géosciences Rennes, Jean-Raynald de Dreuzy), (b) stochastique (champ de perméabilité. © Géosciences Rennes, Jean-Raynald de Dreuzy et INRIA, Anthony Beaudoin, Jocelyne Erhel) et (c) booléenne (réseau de fractures. © Géosciences Rennes, Jean-Raynald de Dreuzy)

- les modélisations directes de champs de paramètres

Si de nombreux progrès ont été accomplis pour la simulation de champs de paramètres (simulations conditionnelles de paramètres ou d'indicateurs par exemple), ces champs sont obtenus à une échelle trop petite, celle du volume de mesure (de l'ordre du m³). Il reste une dernière étape à effectuer, celle du passage à l'échelle de la maille de calcul du modèle (de l'ordre de 10⁵ m²). De nombreux verrous subsistent encore à ce stade de la modélisation des milieux, notamment pour les écoulements multiphasiques et les transferts de solutés.

- le développement de nouveaux concepts et outils

La modélisation des champs de paramètres repose sur des concepts théoriques qui supposent vérifiées des hypothèses assez contraignantes, notamment celles de l'ergodicité et de la stationnarité. Cette modélisation n'est donc pas adaptée en présence d'unités homogènes de taille significative par rapport à l'échelle du domaine modélisé (couches sédimentaires de grandes tailles, quelques fractures importantes au sein d'un champ finement fissuré ou fracturé...). Même si certaines approches abordent cette problématique (approche booléenne pour les unités sédimentaires et approche fractale pour décrire les densités de fractures, Figure 10), de nouveaux concepts et outils de modélisation, associant éventuellement les deux points précédents, doivent être inventés.

■ La modélisation à l'échelle des paysages

Les paysages sont structurés par l'agencement spatial et l'association à l'échelle locale des grands types d'occupation du sol et des écosystèmes qui leur sont associés. À cette échelle, l'approche intégrée des processus physiques et biologiques est particulièrement pertinente. Elle permet l'imbrication de modèles d'écosystèmes, d'hydrologie et d'atmosphère. Elle permet également de travailler sous scénarii anthropiques ou climatiques par exemple.

À cette échelle, de nombreux modèles hydrologiques et géochimiques ont été développés et testés avec succès ces dernières années. On peut citer par exemple des modèles de surface (ISBA, SiSPAT et SiSPAT_isotopes, STICS...), des modèles hydrologiques et hydrauliques pour les bassins ruraux (GR4, MHYDAS, SENEQUE, TOPAMMA, TOPODYN...) et urbains (CANOE, EHU, RUBAR20, UBRs...) ou des modèles couplant les eaux superficielles et souterraines (MODCOU, MARTHE...) à l'atmosphère (module ISBA-SAFRAN). Une plate-forme intégrant une quinzaine de modèles est en cours de développement (SEVE).

Concernant les travaux sur les systèmes écologiques, ils ont été essentiellement centrés sur des échelles spatiales fines, pour les études de processus, ou au contraire très vastes, pour la modélisation du système terrestre. Dans une perspective de compréhension et de modélisation de la biosphère, ces échelles sont insuffisantes dans la mesure où les premières ne fournissent que des résultats difficilement extrapolables alors que les secondes ne permettent qu'une prise en compte limitée des processus élémentaires.

À l'échelle du paysage se posent des problèmes encore trop peu abordés comme :

- la modélisation des événements extrêmes ;
- la résolution numérique des modèles mathématiques à grande échelle ;
- l'évaluation des incertitudes liées notamment au manque d'informations disponibles.

■ La modélisation des événements extrêmes

Les extrêmes environnementaux sont par nature « anormaux », au sens où ces états se rencontrent, dans le temps comme dans l'espace, beaucoup plus rarement que la « normale ». Ils ont cependant des conséquences socio-économiques bien supérieures à la « normale ». Un extrême pour une variable peut provoquer un autre extrême ou un changement radical pour une autre variable (e.g. mortalité marquée pour une espèce suite à une température extrême, pertes économiques résultant d'un extrême naturel et dommages écologiques liés à un pic de pollution). Ces interrelations exigent de manipuler avec soin ces notions : il faut suivre la trajectoire du système, et pas seulement chaque variable physique une par une. Il est alors légitime de se poser la question suivante : la modélisation des événements extrêmes nécessite-t-elle une modélisation adaptée ou peut-elle se « contenter » de l'utilisation de modèles construits en situations standard ?

En effet, rien n'indique que les modèles usuels étalonnés et « validés » en situations dites « normales » gardent toute leur pertinence en situations extrêmes. Les hypothèses émises pour la hiérarchisation des processus, les changements d'échelle et la linéarisation des phénomènes peuvent être invalidées dans des cas où les échelles de temps sont très courtes et/ou les forçages atmosphériques ainsi que les conditions initiales et aux limites (état hydrique des sols, niveau des nappes...) sont très différents.

■ La résolution numérique des modèles mathématiques à grande échelle

La mise en œuvre de modèles distribués reposant sur des maillages spatiaux (qu'ils soient segmentés en unités fonctionnelles ou discrétisés en unités régulières de calcul) se heurte à des difficultés numériques considérables, compte tenu de la géométrie complexe des sites d'étude, de la très grande variabilité des paramètres, des non linéarités très fortes, et donc multiéchelles, des modèles mathématiques (transport réactif, hydrodynamique en milieux non saturés...) et du niveau de précision requis (e.g. rapport de 10^{-6} entre le seuil de potabilité et la concentration à la source pour les solvants chlorés en phase dissoute et prévision du flux de pesticides à l'exutoire d'un bassin versant qui représente quelques pourcents des apports).

Cette activité de modélisation doit impérativement s'appuyer davantage sur des compétences en mathématiques appliquées pour l'amélioration des schémas numériques et sur des compétences en informatique pour pouvoir exploiter au mieux les moyens de calculs intensifs et distribués.

■ L'évaluation des incertitudes

Compte tenu de sa généralité, la question de l'évaluation des incertitudes et de leur impact sur les sorties du modèle (et donc sur la précision des prévisions) est par excellence une question interdisciplinaire. La prise en compte des notions d'incertitude a conduit au développement de modèles ou systèmes stochastiques. Il s'agit de ne plus tenter de prévoir/simuler de façon déterministe l'état futur le plus probable, mais de prévoir/simuler la variabilité des états futurs possibles. Les prévisions/simulations d'ensemble ont l'avantage de tirer profit de toutes les non linéarités présentes dans le modèle, mais comme toute méthode de « force brute » elles peuvent avoir un coût en calcul prohibitif pour un ensemble d'états d'une taille assez importante, sans que cet ensemble garantisse l'expression de la gamme complète des états possibles. Il est donc indispensable de poursuivre également d'autres approches fondées sur une linéarisation au premier ordre du modèle afin d'évaluer le degré de précision des sorties du modèle en fonction des incertitudes existantes sur la description du milieu, des forçages et des conditions initiales et aux limites.

Cette gestion de l'incertitude est particulièrement importante pour des systèmes dont l'information est très partielle (e.g. bassins hydrographiques non jaugés).

■ Conclusions

Compte tenu des enjeux sociétaux et d'une demande de plus en plus prégnante liée à la gestion durable des surfaces continentales, la modélisation du fonctionnement et de l'évolution des SIC s'est fortement développée ces dernières années, de l'échelle des processus élémentaires à celle des paysages.

Pour les prochaines années, des efforts importants devront être menés prioritairement sur les outils de changement d'échelle et sur :

- les processus couplés, aux échelles élémentaires et à l'échelle des écosystèmes ;
- la caractérisation de l'hétérogénéité des surfaces continentales et la variabilité des forçages, aux échelles des écosystèmes et des paysages (approches directes ou inverses) ;
- les outils de simulation et d'évaluation des incertitudes, aux échelles des écosystèmes et des paysages.

Aux différentes échelles évoquées, le développement des outils de modélisation ne peut pas s'abstraire d'une démarche intégrant l'expérimentation, la modélisation explicite, la paramétrisation, le transfert d'échelle et l'évaluation selon des critères établis et reconnus. Cela passe par l'utilisation accrue des mathématiques appliquées et par l'implication des modélisateurs dans la définition des campagnes de terrain, des protocoles et des stratégies d'échantillonnage à mettre en œuvre.

Il convient également de favoriser le développement de plates-formes environnementales de simulation pluriéchelle permettant l'intégration des connaissances et l'échange de méthodes provenant de disciplines différentes.

Enfin, il faut se donner les moyens pédagogiques adéquats (sessions de formation permanente, écoles thématiques, etc.) pour assurer la diffusion des résultats (méthodes, logiciels...) au sein de la communauté SIC.

Deux exemples de valorisation des acquis

Répondre aux demandes et préoccupations sociétales et transférer les savoir-faire acquis vers le secteur des recherches finalisées constituent également l'une des missions de la communauté des surfaces et interfaces continentales. Les deux exemples présentés ci-dessous s'inscrivent dans cette démarche. Ils illustrent aussi le fait qu'en retour, une telle démarche peut être à l'origine de nouveaux questionnements d'ordre scientifique et/ou méthodologique, nécessitant la mise en œuvre d'approches interdisciplinaires de type systémique.

■ L'ingénierie écologique pour la réhabilitation des écosystèmes

L'espèce humaine exerce une pression considérable sur les écosystèmes et les paysages de la planète, dont les conséquences sont énormes sur la diversité et le fonctionnement de ces écosystèmes et des communautés associées. De nombreuses actions humaines ont conduit à des transformations irréversibles des paysages, induisant dans certains cas la disparition de variables de forçage naturelles essentielles à la conservation de ces écosystèmes et des fonctions associées. Par exemple, la régulation des grands cours d'eau a conduit au fait que leur énergie n'est plus dissipée dans la divagation et la création de milieux annexes. Dans ce contexte, tous les écosystèmes dont la genèse et la maintenance dépendaient de ces processus sont amenés à disparaître à court terme, si l'énergie auxiliaire injectée par le cours d'eau n'est pas remplacée par une énergie d'origine anthropique. Cette disparition constitue une perte importante pour les sociétés humaines qui vivent le long des cours d'eau, tant en termes de ressources, que de protection contre les risques hydrologiques, sans parler de la perte culturelle et patrimoniale que constitue la disparition des paysages et de la biodiversité associée à ces habitats. Le coût énergétique d'une restauration globale du fonctionnement de l'hydrosystème étant colossal, et la suppression de certaines fonctions économiques (e.g. navigation ou production d'énergie hydroélectrique) n'étant pas socialement acceptables, la mise en œuvre d'une démarche de conservation et de restauration soutenable impose

une hiérarchisation des objectifs, et par conséquent la mise en place d'outils et de méthodes de gestion, de restauration et de récréation d'écosystèmes. Dans une perspective de survie durable de l'humanité, la conservation des écosystèmes naturels et des services associés a donc imposé l'émergence de l'ingénierie écologique comme science de gestion active des écosystèmes naturels, laquelle passe par l'injection d'énergie dans un système naturel afin de le transformer, de le maintenir ou de le ramener dans un état souhaité.

L'ingénierie écologique se conçoit comme la gestion, l'aménagement ou la manipulation des écosystèmes, des communautés ou des populations ayant une valeur pour les sociétés humaines et l'environnement. Elle combine des compétences fondamentales et finalisées dans des champs aussi variés que les sciences physiques, l'économie, la sociologie ou les sciences du vivant. Elle consiste à analyser un problème d'ordre écologique et à en proposer une solution technique, assortie d'une mise en œuvre programmée dans l'espace et dans le temps et de dispositifs de suivis. La réhabilitation des écosystèmes, des communautés ou des populations constitue l'un des objets de l'ingénierie écologique et passe par la restauration physique des habitats ou par la manipulation des communautés, des espèces ou des populations (contrôle, réintroduction). La conception de méthodes destinées à optimiser la gestion des écosystèmes rentre également dans ce champ, parce qu'elle fournit des outils (e.g. typologies fonctionnelles) permettant de caractériser les écosystèmes, de définir et de hiérarchiser les enjeux de conservation et de proposer des préconisations de gestion et de restauration. La création de nouveaux écosystèmes ayant une valeur durable pour l'homme et la biosphère peut aussi reposer sur une démarche d'ingénierie écologique et rentrer dans ce champ. L'ingénierie écologique passe enfin par la mise au point d'outils biologiques destinés à rendre des services écologiques. Elle s'inscrit dans une démarche de développement durable, puisqu'elle fournit des outils destinés à diminuer l'impact des activités humaines sur les écosystèmes, tout en conseillant et orientant les politiques d'utilisation et de gestion des ressources naturelles.

Deux exemples de valorisation des

La mise au point d'outils performants implique un fort ancrage de l'ingénierie écologique dans les problématiques scientifiques actuelles. Un tel ancrage est en effet indispensable à la réalisation d'objectifs scientifiquement validés et répliquables et à la mise en place de principes et de méthodologies rigoureux, tant dans la conception des outils que dans l'évaluation de leur impact à court et long termes sur l'objet d'étude et sur son environnement écologique et humain. Un tel but passe par une approche systémique reposant sur une démarche pluridisciplinaire intégrant dans une réflexion conjointe les sciences de la vie, les sciences de la matière et les sciences humaines.

Dans ce contexte, l'émergence d'équipes interdisciplinaires autour d'objets ou de problématiques ciblés est indispensable pour structurer cette discipline. En effet, les opérations d'ingénierie font encore très souvent l'objet d'approches scientifiques parcellaires et/ou empiriques, du fait tout autant de la difficulté à mobiliser certaines disciplines sur des problématiques à perspectives appliquées, imposant le dialogue avec les gestionnaires et techniciens de l'environnement, que de l'urgence souvent exigée dans ce genre d'opération ou de raisons budgétaires.

Parmi les enjeux actuels de l'ingénierie écologique figure l'intégration dans les projets d'ingénierie des situations et des expériences passées dans les différents champs scientifiques évoqués. Une telle intégration est encore rarement réalisée, malgré le fait qu'elle peut souvent permettre de prédire efficacement l'issue des opérations d'ingénierie, et même parfois de les réorienter. Cette démarche, qui paraît incontournable au scientifique, reste encore à organiser dans cette discipline en émergence, probablement parce qu'il est difficile de trouver des exemples pertinents dans la littérature et qu'elle repose fortement sur les gestionnaires, plus enclins à développer des démarches empiriques. Cette démarche d'ancrage de la réflexion dans l'expérience passée, qui implique le suivi rigoureux et interdisciplinaire d'expériences, devrait permettre de mettre en place des réseaux thématiques (autour d'objets et de questions transversales). Ces réseaux contribueraient à renforcer la synergie entre les différents acteurs de cette thématique et à améliorer les connaissances tout en garantissant leur caractère innovant. Sur le volet scientifique, les ZA et les ORE pourraient contribuer à alimenter ces réseaux grâce à leur structure pluridisciplinaire et à leur ancrage dans le tissu socio-économique régional.

Au-delà des objectifs de conservation et de restauration, l'ingénierie écologique peut permettre de tester des théories et

des concepts écologiques, par la réalisation d'expériences en vraie grandeur, c'est-à-dire à l'échelle des écosystèmes. Les opérations relevant de l'ingénierie écologique sont cependant encore trop peu intégrées aux problématiques scientifiques, alors qu'elles constituent des outils uniques pour comprendre, par exemple, les processus impliqués dans le fonctionnement des écosystèmes et la manière dont ils sont modifiés par des opérations de grande ampleur menées sur l'écosystème (résistance et résilience de l'écosystème et des fonctions associées). De telles expérimentations sont souvent sous-exploitées, du fait de l'absence de réseaux structurés, entraînant une mauvaise articulation entre sciences fondamentales et finalisées et parfois même une ignorance mutuelle. L'une des priorités scientifiques au sein de ce champ disciplinaire serait donc de combiner de manière plus systématique, dans les projets d'ingénierie, les objectifs « finalisés » aux objectifs relevant de la recherche fondamentale, et ce, sur tous les aspects des projets, qu'ils relèvent des sciences de la vie et de la matière ou des sciences humaines.

■ La remédiation des milieux : le cas des eaux et des sols

● La remédiation des milieux contaminés

La remédiation des milieux contaminés recouvre à la fois les aspects technologiques proprement dits et les impacts des techniques sur la dynamique d'un retour à une biodiversité. Les technologies innovantes de traitement des eaux sont fondées sur des procédés membranaires avec pour objectif d'arrêter physiquement la pollution, mais aussi de la modifier chimiquement pour rendre les contaminants « inertes ». Les milieux contaminés sont remédiés selon deux types d'approche :

- *ex situ*, en dépolluant le sol au moyen de cocktails bactériens ou à l'extrême en incinérant ou stockant les terres polluées ;
- *in situ*, par des barrières réactives dépolluant l'eau souterraine ou par injection de liquides oxydants ou réducteurs.

Actuellement les recherches sont orientées selon trois directions :

- la mise au point de membranes réactives capables de générer des réactions en surface susceptibles de détruire certaines molécules ou de rendre virus et bactéries inactifs

Les problèmes liés à ces procédés concernent le colmatage des membranes, la synthèse de ces matériaux (qui se rapprochent des nanotechnologies) et les cinétiques des réactions recherchées. Ce type de traitement doit faire l'objet d'études sur la réactivité chimique des barrières synthétiques dont on recherche une réponse rapide en termes d'adsorption. Les compétences des communautés ST et SIC en minéralogie des oxydes (Fe, Al, Mn, Ce...) pourraient être utilisées pour obtenir des matériaux dont la taille, la chimie de surface mais aussi la réactivité soient contrôlées et maîtrisées, et ce, en collaboration avec des chercheurs de ST2I, des chimistes et des biologistes.

- l'injection de bactéries dans les eaux souterraines

Plus récemment, des techniques associées à l'injection de bactéries dans les eaux souterraines ont fait l'objet de travaux de recherche. Les difficultés sont liées à la diffusion des espèces bactériennes (colmatage rapide des pores du sous-sol) et à leur réactivité à court terme (pourcentage d'abattement). Les recherches doivent s'orienter vers l'impact de ces procédés sur la biodiversité des milieux, en relation avec l'efficacité et la cinétique d'abattement de la pollution.

- l'injection et le transfert de nanoparticules métalliques

Enfin, des travaux pourraient se développer sur l'injection et le transfert de nanoparticules métalliques pour l'élimination de composés halogénés piégés dans la porosité des aquifères et le contrôle des transferts et de la réactivité, mais aussi pour l'étude de leur impact sur les micro-organismes présents. La communauté SIC (physicochimistes, mécaniciens des fluides, biologistes...) dispose là d'un thème de recherche très intéressant, car il permet de remonter à des mécanismes fondamentaux (e.g. colmatage, agrégation, oxydation-réduction et stress oxydatif) mesurables à toutes les échelles, jusqu'à l'échelle atomique. En complément des microspectromètres de laboratoire, les outils analytiques, en particulier ceux associés aux synchrotrons, apportent des réponses fondamentales sur les mécanismes de transfert et de réactivité de ces nanomatériaux.

• La valorisation des déchets

La production de déchets, en particulier industriels, ne peut plus se concevoir sans une politique forte de valorisation et de recyclage. Pour ce faire, une évaluation environnementale des impacts doit être associée systématiquement aux scénarii de valorisation (routes, digues, matériaux divers...). Cela implique une compréhension des mécanismes de dégradation des matériaux dans leur contexte de valorisation, du relargage des contaminants, de leur transfert dans les milieux récepteurs et

de leurs impacts sur les écosystèmes environnants, en ciblant les organismes et micro-organismes.

• La phytoremédiation

La phytoremédiation inclut un ensemble de techniques utilisant les plantes pour extraire ou inhiber la toxicité des polluants, qu'ils soient inorganiques ou organiques. Cette approche n'est pas encore très répandue en raison de certaines limitations qui pèsent sur ses performances. Si on se limite aux techniques appliquées aux sols, les principaux verrous concernent :

- la difficulté à réduire les concentrations totales en ETM, en conformité avec ce qui est demandé par certaines législations, et à obtenir des résultats compatibles avec celles-ci à un coût économiquement acceptable ;
- la nécessité de devoir définir avec précision les conditions « optimales » de la viabilité de son utilisation (type et caractéristiques du sol, nature du polluant, conditions climatiques, etc.).

Les efforts de recherche doivent porter sur :

- les mécanismes contrôlant la biodisponibilité des polluants pour les plantes, ce qui constitue finalement le « nerf de la guerre » en phytoextraction ;
- la modélisation et la prédiction des variations temporelles de cette biodisponibilité en fonction des prélèvements par la plante et du pouvoir tampon du sol, les contaminations multiples étant souvent les plus fréquentes ;
- les mécanismes de tolérance et surtout d'hyperaccumulation, particulièrement importants pour une phytoextraction efficace et qui sont insuffisamment élucidés ;
- la nécessité de prospecter pour découvrir des espèces ou des populations les plus efficaces possible.

L'ensemble de ces études, pour lesquelles la communauté SIC pourrait trouver un cadre particulièrement novateur, technologiquement et socialement « marqué », mais aussi une base de travaux très fondamentaux, doivent se faire à l'interface de nombreuses disciplines : notamment mécanique des fluides, physique des matériaux, physicochimie, écologie, microbiologie et agronomie. De plus, des liens avec les Pôles de compétitivité pourraient faciliter les approches associant des industriels, en permettant des études sur des sites « pilotes » ou fortement instrumentés. Enfin, des plates-formes d'essais concernant les études de transfert (e.g. Avignon, Grenoble, Nancy et Strasbourg) ou de suivi des matériaux recyclés dans des scénarii variés (e.g. Aix-en-Provence) pourraient être mobilisées.



Annexes

Les dispositifs d'observation

■ Les Services d'Observation (SO) et les Observatoires de recherche en environnement (ORE)

| SO/ORE | Objet du SO/ORE | Date de labellisation |
|------------|--|-------------------------|
| AgrHys | Temps de réponse des flux biogéochimiques aux forçages dans les agro-hydrosystèmes | ORE : 2002 |
| AMMA-CATCH | Observatoire de la variabilité climatique et de son impact hydrologique en Afrique de l'Ouest | ORE : 2002 SO : 2006 |
| BVET | Fonctionnement hydrogéochimique des bassins versants expérimentaux tropicaux | ORE : 2002 SO : 2006 |
| CORAIL | Observatoire des récifs coralliens de Polynésie et du Pacifique | SO : 2007 |
| DRAIX | Observatoire d'un bassin versant fortement érosif | ORE : 2002 |
| F-ORE-T | Observatoire de recherche sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers | ORE : 2002 |
| H+ | Réseau national de sites hydrogéologiques | ORE : 2002 SO : 2006 |
| HYBAM | Hydrologie et biogéochimie de l'Amazonie | ORE : 2002 SO : 2006 |
| LEZARD | Étude intégrée et à long terme de l'impact du réchauffement climatique sur le fonctionnement des populations | ORE : 2002 |
| OHGE | Observatoire hydrogéochimique de l'environnement | SO : 2007 |
| OHM-CV | Observatoire hydrométéorologique méditerranéen Cévennes-Vivarais | ORE : 2002 SO : 2006 |
| OMERE | Observatoire méditerranéen de l'environnement rural et de l'eau | ORE : 2002 |
| OSR | Observatoire spatial régional | SO : 2007 |
| PCBB | Prairies, cycles biogéochimiques et biodiversité | ORE : 2002 |
| REPER | Recherche sur les Écosystèmes des PERTuis charentais | ORE : 2002 |
| RESYST | Réponses d'un système deltaïque aux forçages externes | ORE : 2002 |

■ Les Zones Atelier

| ZA | Objet de la ZA | Date de labellisation |
|-------------------------------------|--|-----------------------|
| Bassin de la Seine | Dynamique de l'hydrosystème Seine | 2001 |
| Bassin du Rhône (ZABR) | Gestion durable des cours d'eau et de leurs bassins versants | 2001 |
| Bassin versant de la Loire | Dynamique de l'anthroposystème Loire | 2001 |
| Bassin de la Moselle | Sûreté et sécurité de l'approvisionnement en eau des métropoles régionales | 2002 |
| Bretagne continentale | Évolution de l'agriculture et des paysages, conséquences sur la biodiversité | 2001 |
| Observatoire Régional Méditerranéen | Dynamique des bassins versants méditerranéens | 2001 |
| Antarctique et Subantarctique | Dynamique des systèmes subantarctiques, réponses aux changements globaux | 2000 |

Les plates-formes écotroniques

■ Les Écolabs de Foljuif

Intégrées au Centre de Recherche en Écologie Expérimentale et Prédicative de Foljuif, ces chambres climatiques permettront l'analyse de la réponse d'écosystèmes terrestres ou aquatiques aux variations environnementales. Les Écolabs seront ouverts aux thématiques écosystémiques les plus variées et notamment à l'étude des réseaux d'interactions trophiques, mutualistes et allélopathiques.

Plateau Écolabs : 24 mésocosmes régulés de 2,25 m² (2 m³), organisés en 8 groupes semi-mobiles. Programmation individuelle et indépendante. Spécifications P2 (évolution possible P3).

Simulation des conditions climatiques : programmation des variations concomitantes de température (-10 à 45°C), humidité relative de l'air (15 à 95 %), pluie, teneur en CO₂, lumière (intensité, spectre).

Mesures : poids des mésocosmes, barométrie, marquage ¹³C après décarbonatation de l'air, quantification et isotopie des flux de CO₂, H₂O, gaz traces CH₄, N₂O, O₃, intensité et spectre de l'éclairement, mésorespirométrie.

Supervision locale, centralisée et générale (intranet et internet).

Avancement du projet : validation du prototype courant 2007, mise en service progressive 2008.

Contact : Bruno Verdier ; bruno.verdier@biologie.ens.fr

■ L'Écotron de Montpellier-Baillarguet

L'écotron sera constitué de 3 plateaux techniques à différentes échelles et d'une instrumentation dédiée à la mesure des flux. Il permettra l'étude de blocs intacts d'écosystèmes terrestres et l'analyse de la réponse de microécosystèmes ou d'individus à une large gamme de conditions environnementales.

Plateau « macrocosmes » : 12 dômes en lumière naturelle, monolithes de sol de 7 à 10 t, 5 m² de végétation.

Plateau « mésocosmes » : 24 enceintes en lumière naturelle, monolithes de sol de 1 m³, surface de végétation modulable de 1 à 4 m².

Plateau « microcosmes » : 20 paillasses en lumière artificielle, classées L2, dont 8 permettant la manipulation d'isotopes radioactifs. Conditionnement environnemental et mesures sur microenceintes.

Simulation des conditions environnementales : température (extérieure + ou - 7°C), humidité relative de l'air (15 à 95 %) et du sol, teneur en CO₂, polluants.

Mesures : marquage en ¹³C après décarbonatation de l'air, mesure en ligne des flux CO₂, H₂O, gaz traces (N₂O, NO_x, NH₃, CH₄) et de la composition isotopique de C, O et H, propriétés optiques du couvert, physiologie des plantes, caractéristiques physicochimiques et biologiques du sol.

Système de contrôle-commande-archivage en temps réel en réseaux.

Avancement du projet : début de la construction printemps 2007 ; maître d'œuvre Auvertech ; mise en service macrocosmes en 2008, mésocosmes et microcosmes en 2009.

Contact : Jacques Roy ; jacques.roy@cefe.cnrs.fr

■ Les bassins aquatiques de Foljuif

Cet ensemble de bassins instrumentés est destiné à l'étude du fonctionnement des écosystèmes d'eau douce, en réponse aux principales conditions physiques, chimiques et biologiques de l'environnement. Ils permettront d'étudier les réseaux trophiques lacustres sur le long et moyen terme.

Macrocossmes : 12 bassins de 250 m³, reconstituant les zones littorales, benthiques et pélagiques d'un lac ; possibilité de confinement sous serres pour l'étude des conséquences des changements climatiques ; épuration des eaux provenant des bassins principaux par des lagunes en aval, avant leur recyclage dans les systèmes expérimentaux.

Mésocosmes ex situ : 24 enceintes cylindriques de 4 m³, partiellement enterrées, pour des expériences plus ciblées ou nécessitant des dispositions particulières (études des cyanobactéries toxiques...).

Mésocosmes mobiles : de taille variable pour immersion dans les bassins.

Avancement du projet : validation du cahier des charges courant 2007, mise en service entre 2008 et 2009.

Contact : Gérard Lacroix ; gerard.lacroix@biologie.ens.fr

■ La plate-forme côtière MEDIMEER de Montpellier - Sète

MEDIMEER (MEDiterranean platform for Marine Ecosystem Experimental Research) est dédiée à l'étude du fonctionnement et de la productivité des écosystèmes marins côtiers et lagunaires soumis à des forçages physiques, chimiques et biologiques.

Mésocosmes in situ : 12 enceintes immergées « pélagiques » (5 m³) et 2 enceintes « pélagiques-benthiques » (50 m³), homogénéisation de la masse d'eau, régulation de la température et du rayonnement ultraviolet B.

Mésocosmes à terre : 12 enceintes « pélagiques » (10 m³) ; 4 enceintes « pélagiques-benthiques » (30 m³) avec régulation thermique et épuration ; 4 enceintes de 3 m³ et 12 de 1 m³ en serres climatisées.

Mésocosmes mobiles : 2 plates-formes instrumentées transportables, l'une « pélagique » avec des mésocosmes *in situ*, l'autre « littorale » avec des mésocosmes à terre.

Mesures : automatisées en continu et à haute fréquence ; variables climatiques, intensité et spectre de la lumière dans la colonne d'eau, chimie de l'eau, photosynthèse, respiration, valvométrie des huîtres, biologie des organismes.

Avancement du projet : mésocosmes *in situ* en service depuis 2003, autres équipements opérationnels entre 2008 et 2013.

Contact : Behzad Mostajir ; bmostajir@univ-montp2.fr

Principaux acronymes

| | |
|----------|---|
| ACCENT | Atmospheric composition change: the european network of excellence |
| ADEME | Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie |
| ADN | Acide désoxyribonucléique |
| AEI | Ateliers expérimentation et instrumentation |
| AMMA | Analyses multidisciplinaires de la mousson Africaine |
| ANDRA | Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs |
| ARN | Acide ribonucléique |
| BRGM | Bureau de recherches géologiques et minières |
| CAPITOUL | Canopy and aerosol particles interactions in Toulouse urban layer |
| CAREN | Centre armoricain de recherches en environnement |
| CEA | Commissariat à l'énergie atomique |
| Cemagref | Centre de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement |
| CEREGE | Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement |
| CIRAD | Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement |
| CNAP | Corps national des astronomes et des physiciens |
| CNES | Centre national d'études spatiales |
| CNRS | Centre national de la recherche scientifique |
| COV | Composés organiques volatiles |
| CPER | Contrat de plan état-région |
| CRPG | Centre de recherches pétrographiques et géochimiques |
| CSOA | Commission spécialisée océan atmosphère (INSU) |
| CSSIC | Commission spécialisée surfaces et interfaces continentales (INSU) |
| CYTRIX | Cycles hydro-biogéochimiques, transferts et impact écotoxicologique |
| ECCO | Écosphère continentale : processus et modélisation |
| EC2CO | Écosphère continentale et côtière |
| ECODYN | Écotoxicologie et écodynamique des contaminants |
| EDD | Environnement et développement durable (CNRS) |
| EDF | Électricité de France |
| EDRE | Évaluation des risques écotoxicologiques |
| EHU | Éléments hydrologiques urbains |
| ERA NET | European research area network |
| ESCOMPTE | Expérience sur site pour contraindre les modèles de pollution atmosphérique et de transport d'émissions |
| ESRF | European synchrotron radiation facility |
| ESSP | Earth system science partnership |
| ETM | Éléments trace métalliques |
| GDR | Groupement de recherche |
| GEOFCAN | Approche géophysique et structurale de l'organisation spatiale et du fonctionnement des couvertures pédologiques anthropisées ou naturelles |
| GFAS | Génétique fonctionnelle, agronomie et santé |
| GFHN | Groupe francophone humidimétrie et transferts en milieux poreux |
| GIEC | Groupe international d'experts sur le changement climatique |
| GIS | Groupement d'intérêt scientifique |
| GMES | Global monitoring for environment and security |
| GPS | Global positioning system |
| GR | Modèles du génie rural |
| HTHS | Hydrodynamique et transferts dans les hydrosystèmes souterrains |
| HyMex | Hydrological cycle in the Mediterranean experiment |
| ASI | Infrared atmospheric sounding interferometer |
| IFR | Institut fédératif de recherche |
| IFREMER | Institut français de recherche pour l'exploitation des mers |
| INERIS | Institut national de l'environnement et des risques |
| INRA | Institut national de la recherche agronomique |
| INSU | Institut national des sciences de l'univers |
| IRD | Institut de recherche pour le développement |

| | |
|----------|--|
| ISBA | Interaction sol – biosphère – atmosphère |
| LCABIE | Laboratoire de chimie analytique, bio-inorganique et environnement |
| LCPC | Laboratoire central des ponts et chaussées |
| LIDAR | Light detection and ranging |
| LSPIV | Large scale particle image velocimetry |
| ILTER | Long term ecological research network |
| MAE | Ministère des affaires étrangères |
| MARTHE | Modélisation d'aquifères avec maillage rectangulaire. Transport et hydrodynamique |
| MEDAD | Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables |
| MHYDAS | Modélisation hydrologique distribuée pour les agrosystèmes |
| MNHN | Muséum national d'histoire naturelle |
| MO | Matières organiques |
| MODCOU | Modélisation couplée |
| OA | Océan et atmosphère (INSU) |
| OCDE | Office de coopération et de développement économiques |
| OHM-CV | Observatoire hydro météorologique Cévennes-Vivarais |
| ORE | Observatoire de recherche en environnement (label du ministère de la Recherche) |
| OSU | Observatoire des sciences de l'univers |
| PAC | Politique agricole commune |
| PATOM | Programme atmosphère et océan multiéchelle |
| PCRD | Programme cadre de recherche et développement (UE) |
| PIV | Particle image velocimetry |
| PME | Petites et moyennes entreprises |
| PNBC | Fonctionnement et dynamique de la biosphère continentale |
| PNCA | Programme national de chimie atmosphérique |
| PNRH | Programme national de recherche en hydrologie |
| POP | Produits organiques persistants |
| PUB | Prediction of ungaged basin |
| REACH | Enregistrement, évaluation et autorisation des substances chimiques |
| RIDES | Ruissellement, infiltration, dynamique des états de surface du sol et transfert des sédiments |
| RIPIECSA | Recherches interdisciplinaires et participatives sur les interactions entre les écosystèmes, le climat et les sociétés en Afrique de l'Ouest |
| SAFIRE | Service des avions français instrumentés pour la recherche en environnement |
| SAFRAN | Système d'analyse fournisseur de renseignements atmosphériques à la neige |
| SAR | Synthetic aperture radar |
| SC | Sciences chimiques (CNRS) |
| SCOA | Surfaces continentales, océan et atmosphère (CNAP) |
| SdV | Sciences du vivant (CNRS) |
| SEVE | Plate-forme de modélisation du système sol eau végétation énergie |
| SHS | Sciences de l'homme et de la société (CNRS) |
| SIC | Surfaces et interfaces continentales (INSU) |
| SIE | Système d'informations environnementales |
| SiSPAT | Simple soil plant atmosphere transfer model |
| SMOS | Soil moisture and ocean salinity |
| SNORE | Système national d'observation et d'expérimentation pour la recherche sur les surfaces et interfaces continentales |
| SO | Service d'observation (label INSU) |
| ST2I | Sciences et technologies de l'information et de l'ingénierie (CNRS) |
| STICS | A generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance |
| TDR | Time domain reflectometry |
| TGI | Très grandes infrastructures |
| TOPODYN | Topographic dynamic model |
| UBRS | Urban runoff branching structure |
| UMS | Unité mixte de service |
| ZA | Zone atelier (EDD/CNRS) |

Coordination éditoriale

Dominique Armand

Réalisation et impression

Imprimé par CARACTERE sur du papier issu de forêts gérées durablement.



Conception

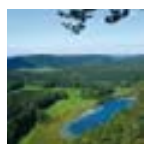
Trait de caractère(s)

Mai 2009

■ Légendes de la mosaïque de couverture



Mésocosme (enceinte expérimentale) pour l'étude de la structure et du fonctionnement des réseaux trophiques pélagiques. Ce dispositif est mis en place sur la plate-forme d'écologie expérimentale MEDIMEER (Mediterranean Platform for Marine Ecosystem Experimental Research, lagune de Thau, Hérault) pour expérimenter l'impact du réchauffement global et de l'augmentation des ultraviolets B. © CNRS Photothèque / MEDIMEER



Paysage jurassien observé du belvédère des quatre lacs dans le Haut Jura (lac du Petit Maclu). © CNRS Photothèque / Jérôme Fournier



Le futur satellite SMOS (Soil moisture and ocean salinity) d'observation de la Terre, dont le lancement est prévu en 2009. SMOS vise à fournir des cartes d'humidité des sols et de salinité des océans. © CESBIO / MIRA



La Garonne en crue dans son avenue de boisements spontanés et de «ramiers» ou peupleraies cultivées. © CNRS Photothèque / LAMBS Luc

Prospective

Institut National des Sciences de l'Univers



INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS

Centre National de la Recherche Scientifique
3 rue Michel-Ange
75794 Paris Cedex 16

<http://www.insu.cnrs.fr>