

Prospective

Institut National des Sciences de l'Univers



**Surfaces et Interfaces
Continetales 2013-2017**

Bilan et Prospective 2013-2017 de la Commission spécialisée Surfaces et Interfaces Contininentales de l'Institut national des sciences de l'Univers

Synthèse des ateliers et forums préparatoires et du colloque de Paris
21 - 23 mai 2013

Sous la coordination de Frederick Delay, président de la CSSIC et Nicolas Arnaud, directeur adjoint scientifique du domaine SIC - INSU

Ont participé à la rédaction de ce document

Anne Alexandre, Fabien Arnaud, Pascale Bauda, Béatrice Béchet, Gilles Bergametti, Cécile Bernard, Yves Brunet, Isabelle Calmet, Mathieu Carré, Christophe Delacourt, Aline Dia, Françoise Elbaz-Poulichet, Jérôme Gaillardet, Yves Godderis, Antoine Grémare, Gérard Gruau, Joël Guiot, Christine Hatté, Serge Heussner, Jérémy Jacob, Yann Kerr, Yvan Lagadeuc, Dimitri Lague, Bruno Lanson, Aude Lemonsu, Corinne Leyval, Pierre Marmonier, Florian Mermillod-Blondin, Catherine Ottlé, Thierry Pellarin, Gilles Pinay, Jérôme Rose, José-Miguel Sanchez-Perez, Géraldine Sarret, Sabine Sauvage, Christian Valentin, Philippe Vandenkoornhuuse, et Jérôme Viers

Secrétariat de rédaction

Dominique Armand

Sommaire

Éditorial	p. 6
-----------------	------

Thèmes fondateurs

Flux de matière et d'énergie, altération, érosion, hydrologie.....	p. 10
Fonctionnement multi-échelles et évolution des écosystèmes continentaux et littoraux sous contraintes « naturelles » ou anthropiques	p. 19
Dynamique des éléments et des contaminants, physicochimie des interfaces, biogéochimie, écotoxicologie	p. 22
Paléo-environnements.....	p. 28

Les outils de la recherche en SIC

Services d'observation	p. 38
Grands instruments, plateformes et outils nationaux	p. 44
Les outils de la télédétection	p. 51
Initiative structurante « Écosphère Continentale et Côtière » – EC2CO.....	p. 54
CRITEX, Équipements d'excellence pour l'étude spatiale et temporelle de la zone critique des bassins versants	p. 56

Défis aux interfaces

Le sol	p. 60
Articulations temps courts/temps longs : l'héritage et l'enseignement du passé pour mieux prédire le futur	p. 64
Paysages urbains	p. 67
Littoral	p. 69

Conclusion

Éditorial

Cette troisième prospective « Surfaces et Interfaces Continentales » (SIC) intervient à un moment sans doute charnière, tant pour notre communauté que pour les questions fondamentales qu'elle aborde et les potentielles retombées sociétales associées. Le besoin d'une analyse globale du fonctionnement du « système » Terre est à présent démontré, et souvent ressenti par nos concitoyens comme une préoccupation majeure. Sa démonstration a été rendue possible notamment grâce à la synergie développée dans un contexte résolument transdisciplinaire entre observation, théorie et modélisation. Dans cette compréhension globale du système Terre, l'appréhension du fonctionnement et des dynamiques spatio-temporelles des surfaces et interfaces continentales occupe une place très particulière car ces surfaces et interfaces sont le support physique de nos sociétés.

Le changement global et ses impacts entrent en forte résonance avec les grands défis sociétaux mis en avant, sans surprise, par les instances françaises et européennes : le changement climatique et l'adaptation nécessaire de nos sociétés, les ressources énergétiques ou alimentaires et leur raréfaction, la sécurité de nos sociétés... À travers ce court énoncé, on mesure combien les communautés travaillant sur les surfaces et interfaces continentales sont au cœur de ces débats par leurs problématiques scientifiques fondamentales : cycle de l'eau, interaction avec la lithosphère, fonctionnement des sols et flux biogéochimiques, échange des surfaces et interfaces terrestres avec l'atmosphère et le vivant, nature et évolution des paysages, enregistrement des crises du passé. Ces problématiques sont naturellement épaulées par des outils (observation, expérimentation, modélisation), par des méthodes (changements d'échelles de temps et d'espace, analyse des systèmes complexes et fortement couplés), par des chantiers d'application (ressources en eau et en sols, pollution et risque écotoxicologique)...

Les communautés d'étude des surfaces et interfaces continentales ont donc un rôle majeur à jouer dans la quête de réponses à ces grandes questions aux retombées fortement sociétales, qu'elles contribueront très certainement à décortiquer pour mieux les appréhender. Et pourtant, elles peinent encore parfois à s'affirmer, malgré, ou peut-être à cause de, la diversité et le grand nombre d'acteurs qui les composent : organismes, universités, alliances, qui tous ensemble doivent décider des chemins à emprunter, des terrains à défricher, des outils et des savoir-faire à développer et/ou employer.

Parmi ces acteurs, l'INSU du CNRS a fêté en 2013 les onze ans d'existence du domaine SIC, entièrement dédié à ces problématiques. Le dernier exercice de prospective remonte à 2007 et les six années écoulées depuis auront été non seulement marquées par l'explosion des questions sociétales, mais aussi par une profonde transformation des appuis stratégiques à la recherche. On peut citer la forte contractualisation de l'activité scientifique, la multiplication des guichets d'abondement et la création des alliances, dont - au premier chef pour nos thématiques - l'AllEnvi. Dans ce contexte, ce nouvel effort prospectif, prévu de longue date comme un événement récurrent permettant de s'étalonner régulièrement à l'aune des progrès accomplis, prend un relief particulier. Il se devait d'être l'exercice révélant la maturité des communautés et proposant des pistes collectives de réflexion et d'action entre tous les acteurs au sein du CNRS et au-delà.

À cette fin, l'exercice de prospective fut divisé en trois étapes. Un travail de collecte de commentaires fut d'abord mené via un site Web interactif permettant à tout un chacun de proposer et débattre autour de questions thématiques et méthodologiques.

Ensuite, un colloque de restitution, rassemblant plus de 200 participants fut tenu à Paris du 21 au 23 mai 2013. Ce fut l'occasion de réaliser une synthèse des connaissances, dont beaucoup ont pu être acquises grâce aux efforts des actions incitatives du CNRS-INSU et de ses partenaires, et notamment de l'action programmatique Écosphère continentale et

côtière « EC2CO ». Cette action rencontre d'année en année un succès qui ne se dément pas, rapprochant les communautés dans des démarches diversifiées, qu'elles soient méthodologiques ou transdisciplinaires, qu'elles ciblent des mécanismes et processus mono-variable ou des couplages complexes, qu'elles auscultent des objets particuliers ou les dynamiques entre ces objets... Dans de nombreux cas, les résultats ont été acquis à l'aide d'outils offerts par la structuration du domaine SIC, notamment les Services d'observation. L'analyse de ces services montre que, s'ils manquent encore un peu d'organisation et de visibilité, la qualité et l'utilisation de leurs données en recherche fondamentale sont avérées et constituent une base solide pour la documentation de nombreuses et ambitieuses questions scientifiques. La communauté s'est également dotée des moyens nécessaires aux exceptionnels sauts d'échelles d'espace qui lui sont imposés, depuis les processus de très petite échelle aux interfaces étudiés avec les méthodes de la (géo)chimie et de la (géo)physique, jusqu'à l'échelle du paysage abordée avec la télédétection et l'imagerie spatiale. La prochaine frontière des SIC sera sans doute celle du couplage des échelles spatiales et temporelles, incluant les interactions entre temps courts et temps longs, voire très longs aux échelles de temps géologiques. La diversité des objets et des échelles d'observation, couplée à la complexité des mécanismes mis en jeu à toutes ces échelles, rend en général très difficile la compréhension univoque des résultats d'observation, d'expérimentation et de mesure. Pour cela, un effort conceptuel de modélisation, venant en appui, voire en préparation de diverses investigations, s'avère nécessaire. De plus en plus utilisée ces dernières années, la modélisation devient progressivement un moyen d'étude naturel à toutes les communautés des SIC.

Avec ce bagage et ces outils, les communautés des SIC sont armées pour répondre au défi de la forte attente sociétale sur des sujets nouveaux ou revisités sous de nouveaux angles et qui ont constitué la dernière journée du colloque de mai 2013 : les sols, le cycle des éléments essentiels à la vie (eau, nutriments), les risques sur les ressources, les échanges de matière et d'énergie entre géosphère, biosphère, hydrosphère et atmosphère, le littoral entre terre et mer, l'environnement urbain, la construction des paysages... Autant de sujets qui appellent également à plus d'interdisciplinarité encore, notamment avec les sciences du vivant et les sciences de l'homme et de la société.

Il est d'ailleurs remarquable que l'objet « surfaces continentales » réunisse l'essentiel des ingrédients nécessaires à la vie aux interfaces Terre solide – Océan et Terre solide – Atmosphère et représente ainsi une zone critique pour la vie, y compris celle de l'homme. Cette *zone critique* pourrait devenir un concept intégrateur et emblématique, non pas exclusif mais inclusif de toutes les communautés qui souhaiteront accompagner les SIC dans l'âge adulte.

Rédigé sous la direction d'un comité d'édition restreint (membres choisis de la Commission spécialisée SIC et chargés de mission auprès de la direction SIC du CNRS-INSU), ce document est la dernière étape de l'effort de prospective. Il reprend les principaux états des lieux et propositions issus des deux premières phases. Les textes consignés dans ce document ont fait l'objet de nombreux allers et retours entre leurs rédacteurs et les acteurs de la science portée et animée dans chaque laboratoire. Ils devraient par conséquent s'affirmer comme un reflet de l'ambition des communautés des surfaces et interfaces continentales.

Nous espérons que ce document constituera un élément de référence qui permettra de rassembler les communautés autour d'un projet ambitieux participant fortement à la construction d'un environnement plus sûr et plus durable pour nous tous. Plus stratégiquement, nous espérons également qu'il puisse faire valoir auprès de la société civile le bien-fondé d'une activité scientifique dont les protagonistes n'œuvrent pas dans l'errance mais formulent leurs questions en les justifiant autant sur leur envie d'améliorer les connaissances que sur l'écoute de leurs concitoyens.

Nicolas Arnaud

Directeur adjoint scientifique Surfaces et interfaces continentales



Thèmes fondateurs

Flux de matière et d'énergie, altération, érosion, hydrologie

Dans son rapport de conjoncture 2010, la section 20 du Comité National de la Recherche Scientifique a procédé à une analyse des forces et faiblesses de la communauté française SIC et des verrous ouvrables à court et moyen termes par cette communauté dans la thématique flux *sensu lato*. Bien que relevant le caractère nécessairement interdisciplinaire des recherches menées, cette analyse s'est organisée de manière relativement disciplinaire, un rapport de conjoncture se voulant avant tout un exercice d'inventaire des forces et faiblesses de chacune des disciplines concernées au temps t. Cette analyse a révélé les succès majeurs enregistrés par les équipes françaises dans plusieurs domaines, comme les avancées remarquables faites dans le suivi des états de surface par imagerie satellitaire à haute résolution ou dans la caractérisation des propriétés et de la réactivité des surfaces minérales et organiques élémentaires. Parallèlement, elle a aussi conduit à l'identification de verrous ouvrables à court et moyen termes par ces mêmes équipes, comme le couplage atmosphérique – souterrain pour les flux d'eau et de matière, la quantification des flux et des bilans de matière et d'énergie à l'échelle du bassin versant élémentaire ou encore l'upscaling de la réactivité à l'échelle nanométrique des surfaces minérales et organiques et sa prise en compte, en la couplant au transport, à l'échelle de systèmes réactifs macroscopiques (profil de sol, milieu poreux hétérogène...).

Dans la présente prospective, nous avons délibérément choisi une autre voie, consistant à organiser la réflexion autour d'un concept fédérateur en émergence, le concept de zone critique. Sans tourner le dos aux disciplines, dont le développement reste essentiel à l'amélioration des connaissances dans le domaine des SIC comme dans les autres domaines, il nous a semblé que

ce concept, par les dimensions intégratives et dynamiques qu'il recouvre, avait la capacité de fédérer les différentes communautés concernées par la problématique des flux et des transferts de matière au sein des surfaces continentales et à leurs interfaces.

■ La zone critique : un concept et un objet de recherche intégrateur

La zone critique (ce terme de *critical zone* a été proposé pour la première fois par le *National research council* des États-Unis en 2001) peut être définie comme la zone s'étendant de la roche mère imperméable au sommet du couvert végétal, dans laquelle l'eau interagit avec les surfaces continentales, un mécanisme spécifique de la planète Terre. C'est dans cette zone que l'eau est stockée et acquiert sa composition chimique et que les polluants apportés par l'homme circulent, sont transformés et impactent éventuellement les organismes vivants. La zone critique des surfaces continentales est ainsi un carrefour d'interactions entre les cycles de l'eau et les cycles biogéochimiques, avec des effets régulateurs de premier ordre sur la qualité et la quantité des ressources en eau, sur l'intensité des flux biogéochimiques échangés entre le minéral et le biologique (avec des conséquences sur la productivité des écosystèmes et des agrosystèmes, notamment pour les nutriments) ou encore sur la composition de l'atmosphère et sur le climat. C'est aussi un lieu fournissant un nombre très important de biens et de services à l'humanité, dont certains sont fondamentaux, comme la production de ressources alimentaires, le stockage et la fourniture d'eau, l'entreposage des déchets, la fourniture d'espaces récréatifs... (Fig. 1).

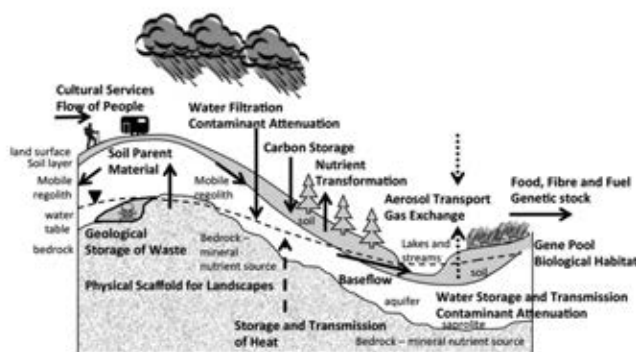


Figure 1. Principaux biens et services fournis par la zone critique de la Terre. © 2013, the University of Sheffield, United Kingdom, ISBN: 978-0-9576890-0-8

L'importance des enjeux impose à la communauté scientifique de se mobiliser pour élucider et modéliser le fonctionnement de ce système complexe d'interfaces entre le physique, le chimique et le biologique qu'est la zone critique. L'effort consenti dans la période récente par la communauté scientifique française est très important avec, en particulier, la constitution de plusieurs réseaux d'observatoires élémentaires de cette zone [Réseau des bassins versant (RBV), Réseau des sites hydrogéologiques (H⁺), Réseau d'étude des tourbières, Observatoire de recherche en environnement sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers (F-ORE-T), etc.], parfois soutenus par des programmes comme les ÉquipEx (e.g., CRITEX). Cet effort de structuration accompagne une initiative mondiale autour de la zone critique dont la France est un des éléments moteurs. Il est fondamental que les efforts entrepris, qui donnent à la communauté française une des toutes premières places dans un domaine de recherche on ne peut plus important et concurrentiel, soient soutenus et amplifiés dans l'avenir. La zone critique n'est certes pas un concept nouveau; il doit être compris comme un «chapeau» sous lequel de nombreuses disciplines, devenues très spécialisées, peuvent se retrouver, échanger et travailler ensemble vers une étude plus holistique de cette zone cruciale pour la planète et pour l'humanité.

■ Les priorités et les moyens à mettre en œuvre pour étudier et modéliser la zone critique

• Appréhender les imbrications entre grands cycles de matière et d'énergie

L'approche intégrée des cycles hydrologiques et biogéochimiques au sein de la zone critique et l'analyse et la modélisation des couplages existant entre processus et caractéristiques du milieu revêtent des enjeux essentiels. Afin d'appréhender l'impact des différents forçages sur les flux géochimiques au sein de la zone critique et à ses différentes interfaces, il est plus que jamais indispensable d'acquérir des séries de données temporelles à l'échelle d'observatoires positionnés sur des gradients climatiques et recoupant des lithologies, des couverts végétaux et des types d'occupation du sol variés (Fig. 2). Cela passe clairement par le suivi en parallèle d'un certain nombre de grandeurs communes à l'ensemble des réseaux d'observatoires gérés par la communauté scientifique française et interfacés avec les réseaux internationaux (précipitation et débits d'eau, évapotranspiration réelle, flux de carbone organique et inorganique dissous, flux de MES, flux d'azote, flux d'aérosols, etc.). Cela passe aussi par le déploiement sur ces sites d'approches intégrées interdisciplinaires associant hydrologues, géochimistes, pédologues, géomorphologues, micro-météorologistes, écologues, microbiologistes, etc.



Figure 2. Les observatoires positionnés sur des gradients climatiques, lithologiques et de pressions anthropiques (ici le cas du SOERE RBV) sont des outils de choix pour aborder la question des couplages au sein de la zone critique. © 2013, The University of Sheffield, United Kingdom, ISBN: 978-0-9576890-0-8

L'acquisition et l'exploitation optimales des données d'observation nécessitent un effort soutenu de conceptualisation de la zone critique, avec le développement d'outils aptes à simuler, aux différentes échelles spatio-temporelles d'observation, les processus et milieux concernés. Pour ce faire, des modèles, même simples, des outils théoriques plus élaborés (e.g., méthodes de changement d'échelle) ou des codes numériques (e.g., méthodes de calcul à hautes performances) adaptés doivent être développés. Par ailleurs, une attention particulière doit être portée sur la question du couplage, dans les modèles, des différents processus impliqués (interaction eau – roche, hydrologie, transport en milieu poreux, transfert d'éléments dans la végétation, flux turbulents de gaz et de matière dans la basse atmosphère, etc.), avec, à la clé, la question des passerelles numériques entre les outils dédiés à la modélisation de chaque processus pris séparément. Afin de développer des approches de modélisation mécaniste des phénomènes de transfert de solutés ou de solides au sein de la zone critique et à ses interfaces, il est impératif que les processus élémentaires soient rigoureusement identifiés et les constantes physicochimiques associées contraintes. Le recours à l'expérimentation en laboratoire est indispensable pour atteindre ces deux derniers objectifs.

Enfin, il est important, dans le cadre des études de long terme, que la communauté SIC puisse se mettre en position d'utiliser de façon plus systématique les «ré-analyses» atmosphériques, permettant de faire le lien entre longues simulations et données des observatoires. La disponibilité de longues ré-analyses (sur 50 voire 100 ans) a déjà permis de prendre en compte la variabilité naturelle du climat, de déceler des tendances imposées par l'homme et d'évaluer certains phénomènes importants dans le fonctionnement des écosystèmes, comme les sécheresses.

• Mieux modéliser la dynamique de l'eau

L'eau étant le moteur principal de l'altération chimique et un vecteur majeur des transferts de matière au sein de la zone critique et à ses interfaces, il est essentiel de progresser dans la modélisation de la dynamique de l'eau. La question des limites actuelles de la modélisation se pose dans différents domaines. Parmi ceux-ci, l'étude de l'hydrologie des bassins versants de montagne se heurte à plusieurs défis scientifiques (forte hétérogénéité spatiale, forçages météorologiques complexes, transport éolien, interfaces neige – glace, neige – végétation, neige – sol et leurs impacts sur les flux, descriptions de sous-maille...) qui induisent sans doute des biais importants dans les modèles climatiques actuels. La modélisation des zones karstiques, qui couvrent 35 % du territoire français, doit également progresser. Cela passe par une meilleure interprétation des expériences de traçage, le développement de nouveaux traceurs naturels et artificiels, ainsi que l'amélioration des interprétations des essais hydrauliques. Il s'agit aussi de proposer et de mettre en place de nouvelles méthodes de spatialisation de la vulnérabilité de ces zones, en lien avec les acteurs et gestionnaires de l'eau.

Au-delà de la prise en compte des différents milieux, la représentation par les modèles de la réponse des végétaux à la sécheresse, actuellement très simplifiée, constitue un autre défi. Les mécanismes à l'œuvre à l'échelle de la plante méritent d'être mieux compris et décrits. Une meilleure modélisation des différents compartiments de la biomasse ligneuse (notamment des branches les plus fines) permettrait d'avancer sur cette question, mais, pour construire et valider les modèles, le besoin de données est prégnant. La production et la mise à disposition de données phénologiques et dendrochronologiques validées et documentées, au moins sur la France, seraient pour cela particulièrement pertinentes. Un autre défi est l'intégration des changements d'occupation des sols dans la modélisation. Ces changements ont un impact évident sur les crues rapides mais posent le problème de leur prise en compte dans les modèles, du fait de leur forte hétérogénéité spatiale. Ces changements posent aussi des questions relatives à leur effet sur la dynamique spatio-temporelle des sédiments et des substances associées (notamment toxiques) dans les bassins versants. Il semble urgent de formaliser ces modifications temporelles de l'occupation des sols dans les modèles hydrologiques et les schémas de surface.

Sur un plan méthodologique, l'assimilation de données (collectées *in situ* ou par télédétection) doit permettre, à l'instar de l'océanographie et de la météorologie, des avancées significatives en hydrologie. Un effort particulier reste à faire dans le domaine de l'assimilation, dans les modèles hydrologiques, de données

satellitaires dans différentes longueurs d'onde. Dans ce contexte, l'apport du satellite SWOT pourrait, à l'horizon 2020, fournir des informations très utiles sur l'évolution des hauteurs d'eau des rivières.

Enfin, au-delà de ces échelles les plus fines, la question du changement d'échelle se pose naturellement. Comment passe-t-on de la représentation d'un processus détaillé à petite échelle (la feuille par exemple) à ce qui se passe à l'échelle du couvert végétal, du paysage, de la région ou du continent? Comment choisit-on les processus à représenter et surtout ceux à ne pas représenter? Cette question rejoint celle de la régionalisation du changement climatique avec les problématiques d'échelles que pose le fait de vouloir relier la variabilité climatique à la structure ramifiée et emboîtée des hydrosystèmes. Elle nécessite la construction de méthodes de descente d'échelle robustes (statistiques ou statistico-dynamiques) spécifiquement élaborées pour l'analyse d'impacts d'un processus sur un autre.

• Identifier les « hot spots » et les « hot moments » réactionnels

La question de l'hétérogénéité spatiale et temporelle des processus réactionnels à l'œuvre dans la zone critique est une question centrale dans l'étude et la modélisation de la zone critique. Localiser les « hot spots » réactionnels internes à la zone critique et identifier leur caractère pérenne ou au contraire transitoire (« hot moments ») est fondamental, dans la mesure où ces lieux constituent des espaces particuliers au sein desquels les réactions se produisent à des vitesses et à des taux beaucoup plus élevés que partout ailleurs au sein de la zone critique (Fig. 3).

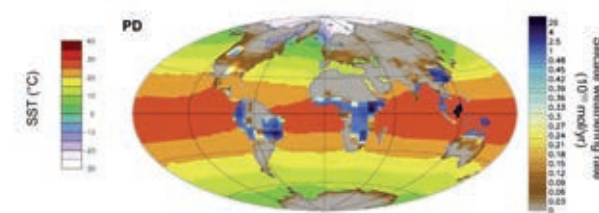


Figure 3. Simulation du taux d'altération des silicates à la surface des continents terrestres, il y a 50 millions d'années. Cette simulation illustre bien la notion de « hot spots » réactionnels en montrant que l'Amérique du Sud, l'Afrique sub-saharienne et l'actuelle Chine constituaient des régions d'intense altération des silicates à cette époque. © Lefebvre V. et al., *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2013

Un bon exemple de ces « hot moments » est fourni par les événements climatiques extrêmes, lesquels constituent des périodes d'expression maximale des flux de matière. Une problématique que la communauté SIC n'a que peu approchée

dans ce domaine de l'altération est celle des variations à haute fréquence (i.e., de la minute à la journée) de la composition chimique des eaux, dont l'exploration devrait fournir un éclairage sur des processus encore mal connus, jouant à de très petites échelles de temps mais importants pour leurs couplages avec les processus plus lents. Un autre intérêt de l'approche « hot spots » et « hot moments » est qu'elle fournit un cadre d'expression de l'interdisciplinarité, sachant que les « hot spots » et « hot moments » réactionnels de la zone critique sont par essence des « lieux » et des « moments » où s'exacerbent les interactions usuelles entre le monde vivant, l'eau et le minéral.

• Mieux prendre en compte la méso-échelle dans l'analyse du fonctionnement de la zone critique

Sur le plan de l'altération chimique et des transferts de solutés au sein de la zone critique, la connaissance des processus aux très petites échelles (typiquement du micromètre au nanomètre) s'est considérablement améliorée ces dernières années, grâce notamment au développement des méthodes d'imagerie à haute résolution de type synchrotron, MET, ou NanoSIMS, avec des avancées majeures dans les domaines de la spéciation des éléments, des processus de dissolution et de croissance des minéraux, des processus d'adsorption des éléments à la surface des parois bactériennes, etc. Des progrès tout aussi considérables ont été réalisés aux grandes échelles; on sait par exemple maintenant qu'à l'échelle des continents un découplage partiel existe entre les processus érosifs, restreints pour une grande part

aux chaînes de montagne, et les processus d'altération, distribués de manière plus uniforme, avec un rôle non négligeable des plaines de piémont. À l'inverse, la méso-échelle, échelle allant du bloc de sol au bassin versant d'ordre 2 ou 3, a fait l'objet de beaucoup moins d'études (Fig. 4).

Ce hiatus d'échelle n'est pas surprenant dans la mesure où les échelles dites intermédiaires constituent précisément le lieu d'expression maximale des interactions entre la physique, la chimie et la biologie, ce qui en rend l'étude nécessairement interdisciplinaire et donc particulièrement complexe. Ces échelles sont cependant primordiales dans la compréhension des transferts et dans la prédiction de la réponse des systèmes aux perturbations. L'investigation de cette méso-échelle passe par l'installation de panoplies de capteurs, ce qui peut s'avérer compliqué et coûteux à mettre en œuvre, et par le développement de techniques intégratrices comme la scintillométrie pour la mesure des flux dans les basses couches atmosphériques (voir plus loin). Elle pose également la question de l'expérimentation au laboratoire et du type d'expérimentation à promouvoir.

La modélisation à cette échelle est également un enjeu important. Par exemple, il n'existe pas actuellement de modèles capables de prédire les transferts de carbone organique dissous à l'échelle du bassin versant en fonction des conditions hydroclimatiques, alors que ces transferts sont critiques pour prédire le devenir des nombreux polluants véhiculés (métaux, pesticides, résidus médicamenteux). Incidemment, ces informations sur la fraction dissoute sont également des données fondamentales du bilan de carbone, tel qu'il est impliqué dans l'évolution du climat

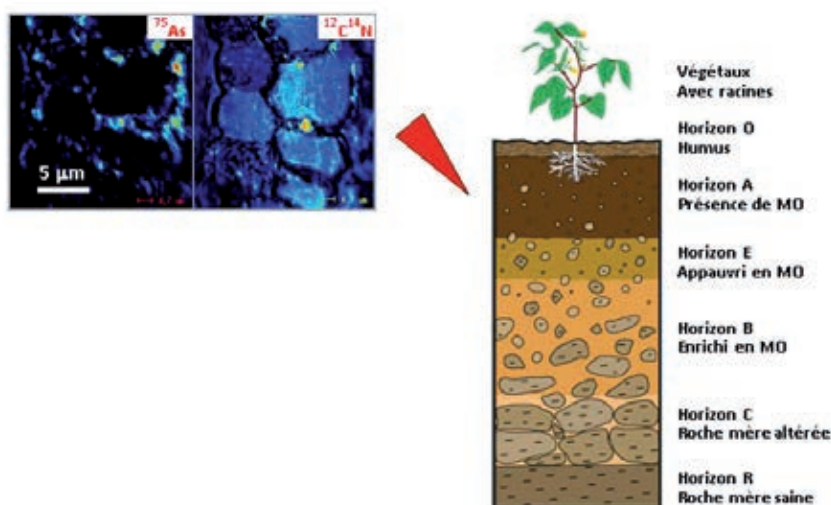


Figure 4. Image Nano-SIMS (résolution 150 nanomètres) montrant l'association étroite de l'arsenic (As) avec des amas organiques riches en azote (matérialisés par l'ion $^{12}\text{C}^{14}\text{N}$), dans la partie organique d'un profil de sol. La considération de la totalité du profil indiquant une disparition progressive de la matière organique avec la profondeur, il est plus que probable que cette image d'une association entre arsenic et matière organique ne rende pas compte de la spéciation moyenne de l'arsenic à l'échelle du profil de sol. © Géosciences Rennes, Gerard Gruau

global. La question des bilans de matière, d'énergie ou encore d'intrants anthropiques à méso-échelle apparaît comme un domaine insuffisamment exploré, dont l'approche nécessite de coupler l'étude des flux de sortie de la zone critique à celle des flux entrants, à savoir les échanges entre la basse atmosphère et le sol. Les progrès récents en modélisation atmosphérique, depuis les très fines échelles (notamment la LES ou *large-eddy simulation*) jusqu'à la méso-échelle, fournissent à ce propos des outils de couplage très puissants entre le substrat, le couvert végétal et l'atmosphère. Un bon exemple où un tel couplage s'avère nécessaire est celui de l'érosion éolienne, phénomène sous la dépendance étroite de l'état de surface des sols (degré d'encroûtement notamment), des caractéristiques de la couverture végétale (degré de recouvrement notamment) et de l'écoulement turbulent au voisinage du sol. Au-delà de ces liens entre compartiments de la zone critique, la question du couplage entre le biologique et le physicochimique est elle aussi au cœur des enjeux, tant ce couplage est un élément déterminant des processus à l'œuvre à cette échelle. Une question émergente, et à cet égard emblématique par les processus, compartiments et échelles en jeu, est celle du transport de micro-organismes, depuis les couches superficielles du sol et la végétation jusqu'aux nuages où ils peuvent poursuivre leur cycle de vie.

• Imager la structure de la zone critique

La complexité de la zone critique rend difficile son analyse et sa modélisation, en ce qui concerne tant sa géométrie que ses propriétés, dont la localisation des zones les plus actives du point de vue biogéochimique. Progresser dans ce domaine passe par le développement de méthodes d'imagerie géophysique à haute résolution spatiale (Fig. 5), notamment pour pouvoir accéder à la structure des parties les plus superficielles de la zone critique (i.e., de 0 à -1 m). De grands chantiers existent actuellement dans le domaine de la géophysique de ces parties très superficielles. Des réflexions sont notamment menées autour de la nature des liens existant entre propriétés agropédologiques et propriétés magnétiques (aimantation totale, susceptibilité et viscosité) de ces parties, ainsi qu'autour de la possibilité d'utiliser les méthodes magnétiques pour cartographier les pollutions ou caractériser les phénomènes d'érosion et de transport sédimentaire dont elles sont le siège. Des lacunes importantes perdurent néanmoins. Les parties les plus superficielles de la zone critique, pourtant parmi les plus réactives du fait de leurs fortes teneurs en matière organique, échappent pour l'instant à toute cartographie exhaustive, alors que de fortes variabilités d'épaisseur de cette zone existent, parfois sur de très petites échelles spatiales.

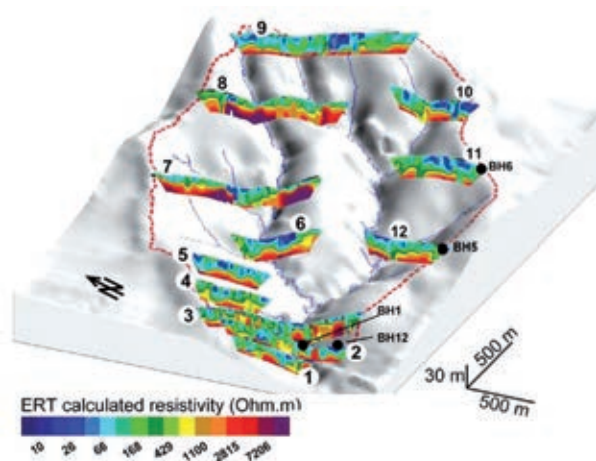


Figure 5. Profils de résistivité électrique de la zone critique d'un bassin versant du réseau RBV. La tomographie de résistivité électrique est une des nombreuses méthodes géophysiques explorées pour imager la zone critique de la Terre. © Braun J.-J. et al., *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2009

Les méthodes sismiques et géodésiques appliquées à l'hydrogéologie sont également en plein développement, avec des progrès attendus à court terme en ce qui concerne la caractérisation de l'hétérogénéité des réservoirs ou encore le monitoring du continuum zone non-saturée – aquifère et des transferts dont il fait l'objet. D'un point de vue plus global, l'utilisation des méthodes géophysiques pour explorer la zone critique implique très clairement d'avancer sur la question de la représentativité des mesures, et notamment savoir si des signaux (résistivité/conductivité électrique, chargeabilité, permittivité diélectrique, susceptibilité/viscosité magnétique, vitesse acoustique, température, teneur en eau, densité...) pouvant être stationnaires sur de courtes échelles de temps ou au contraire fortement transitoires sont aptes à révéler à la « bonne » échelle les processus hydrogéo-biologiques clés affectant cette zone.

Complémentaires des méthodes géophysiques de sub-surface, les données satellitaires constituent également un moyen d'accéder à la structure et aux propriétés de la zone critique. Les résolutions atteintes par les systèmes satellitaires existants (Pleiades par exemple) ou à venir (Sentinelles par exemple) permettent une description et un suivi fins de l'occupation des sols. Couplées à des mesures au sol ou en forage, les méthodes de télédétection constituent un impératif pour aborder l'échelle régionale. Parallèlement, la miniaturisation de nombreux capteurs géophysiques embarqués, l'accessibilité relative aux avions légers et le développement actuel des drones permettent d'entrevoir des capacités nouvelles d'imagerie à des profondeurs intermédiaires et sur des surfaces plus importantes que le versant ou le profil de sol. La mise en œuvre de ces capacités nécessitera des

développements spécifiques (modélisation, inversion, adaptation instrumentale) au regard des contraintes de l'aéroporté (intégration en vol, hauteur de vol, positionnement...).

Enfin, un défi pour la communauté doit être d'arriver à mieux croiser la spécificité de chacune de ces techniques géophysiques avec les questionnements scientifiques. En clair, il s'agit ne pas faire de l'outil une finalité, mais de le rendre utile à la problématique scientifique.

• Améliorer la mesure des paramètres nécessaires à la modélisation des flux d'eau et de matière

Une meilleure modélisation des flux d'eau et de matière au sein de la zone critique et à ses interfaces passe par une amélioration de la mesure des paramètres nécessaires à cette modélisation. La géophysique de surface (méthodes sismiques, polarisation spontanée et induite, résonnance magnétique du proton...) peut être utile à l'étude des transferts dans la zone critique. Cependant, des progrès sont à réaliser sur les théories permettant d'expliquer les réponses observées sur le terrain et en laboratoire. Parallèlement, il semble nécessaire d'améliorer la fiabilité des appareils d'acquisition (stabilité des électrodes de mesure par exemple). Enfin, le développement de mesures sur lysimètres paraît souhaitable. Un autre enjeu de la métrologie concerne le suivi, dans les bassins versants, de flux de sédiments et de substances associées, afin d'accéder à une meilleure connaissance des propriétés des sédiments (granulométrie, géométrie, vitesse de chute) en lien avec leur dynamique spatio-temporelle.

La mesure de l'évaporation à la surface de la zone critique par la technique des covariances turbulentes est maintenant bien éprouvée, tout au moins sur des sites plans et homogènes; sa réalisation en terrain complexe nécessite des réseaux de mâts ou de tours, dont l'implantation reste à déterminer au cas par cas. De nombreux travaux, qui ont fait l'objet d'ouvrages de synthèse, ont été effectués à ce sujet dans le cadre des réseaux mondiaux de «tours à flux» (Fluxnet). Le développement de la simulation atmosphérique à fine échelle est en outre appelé à fournir des outils d'optimisation des dispositifs expérimentaux. Par ailleurs, la scintillométrie optique est devenue opérationnelle ce qui, dans la panoplie des outils de mesure des flux, comble le «trou» entre les stations locales au sol et les méthodes plus globales (bilans atmosphériques ou hydrologiques, mesures aéroportées). Cet outil, qui permet une mesure des flux énergétiques intégrée spatialement sur des trajets de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres, a vocation à se répandre au sein d'une communauté de plus en plus large. Son équivalent dans le domaine spectral des microondes, susceptible de donner directement

accès au flux d'évaporation intégré à l'échelle du paysage, est encore en plein développement. Enfin, le projet de mini-satellite franco-américain Thirsty pourrait délivrer à l'horizon 2020, grâce à sa résolution spatiale inégalée dans l'infrarouge thermique (une cinquantaine de mètres) et à son faible temps de revisite (trois jours), des informations d'une très grande utilité pour l'estimation de l'évaporation de la zone critique.

La recherche sur le cycle de l'eau aux échelles régionales et continentales nécessite un meilleur suivi des précipitations à grande échelle. Dans de nombreuses régions, les réseaux de mesures *in situ* sont insuffisants pour mener des études de bilan pertinentes et il apparaît que la télédétection spatiale représente actuellement le seul moyen à notre disposition pour fournir un suivi des précipitations sur de grandes étendues. Ce suivi est notamment un enjeu fort dans l'étude de la rétroaction des modifications du cycle de l'eau sur la dynamique du climat, ou encore de l'évolution des risques liés à l'intensification du cycle hydrologique. La recherche météorologique et méthodologique dans ce domaine doit être poursuivie et la communauté SIC se doit d'être motrice dans la dynamique GPM (Global precipitation measurement), à travers son expertise sur la caractérisation de la structure et de la variabilité des précipitations.

Le suivi de la végétation apporte des éléments importants à plusieurs égards (réponse de la végétation aux différents facteurs environnementaux, modélisation des échanges neige-végétation, étude du cycle du carbone, calcul de l'évapotranspiration...). Les systèmes couplés permettent aujourd'hui de simuler la croissance des végétaux et la télédétection spatiale de paramètres biophysiques tels que le LAI (indice foliaire) ou le FAPAR (fraction de rayonnement active vis-à-vis de la photosynthèse), que l'on sait de mieux en mieux assimiler dans les modèles de surface, constitue dans ce domaine un apport incontestable.

La mesure des paramètres du manteau neigeux (hauteur, densité, taille des grains, température...) est indispensable pour une meilleure prévision des débits en zone de montagne et une meilleure estimation du risque d'avalanche. Au-delà des mesures de terrain qui sont réalisées, la télédétection spatiale semble être la meilleure façon d'appréhender la variabilité spatiale du manteau neigeux grâce à la couverture géographique et à la répétitivité élevée des observations. Sur ce thème, deux axes principaux de recherche méritent d'être consolidés et soutenus: d'une part le traitement et l'interprétation des données satellitaires ou aéroportées et d'autre part leur assimilation pour l'amélioration de la modélisation numérique. L'imagerie satellitaire est à ce propos un outil indispensable pour régionaliser la mesure des paramètres glaciaires. Aussi faut-il continuer à soutenir l'accès aux données de télédétection à haute résolution spatiale et haute répétitivité temporelle (programmes tels que Pléiades ou Sentinelles), dont

le périmètre devrait en outre être élargi aux données SAR (radar actif), encore trop peu utilisées par la communauté scientifique de la cryosphère en France.

• Connaître et utiliser le potentiel des nouveaux traceurs géochimiques et notamment des isotopes stables non conventionnels

Le développement des outils d'étude de la zone critique ne se limite pas à la géophysique. Les rapports isotopiques des éléments, grandeurs intensives, fournissent des contraintes essentielles sur les transferts de masse. L'étude des isotopes stables dits traditionnels de C, O, H et S a montré tout l'intérêt de ces outils, avec par exemple des applications dans les domaines de la reconstitution des paléo-températures, de l'accès aux sources et aux bilans d'eau dans les bassins versants ou du traçage des sources de carbone dans les sols et les eaux. Si l'étude à haute fréquence temporelle de ces variations isotopiques reste un domaine peu ou pas exploré, l'avènement de nouveaux appareils de terrain le rend désormais accessible, avec en perspective la possibilité de réaliser des mesures directes de flux isotopiques dans l'atmosphère. L'accès aux isotopes stables dits « non traditionnels » (B, Li, Fe, Si, Ca, Mg, Cu, Zn, Cd, Hf) qu'offre le développement récent des spectromètres de masse à source plasma de dernière génération permet également d'entrevoir un élargissement de ces applications, avec le franchissement de nouvelles frontières dans le domaine de la compréhension du cycle et de la dynamique des éléments (par exemple, les isotopes des métaux, co-enzymes biologiques, sont d'excellents traceurs de l'intervention du biologique dans le cycle et la dynamique des métaux). La mesure des isotopes des métaux à rôle biologique connaît un développement important dans les roches archéennes, alors que paradoxalement, leur comportement dans la zone critique est peu ou pas connu.

L'utilisation de ces nouveaux systèmes isotopiques comme outils d'investigation de la zone critique nécessite d'inventorier les variabilités des concentrations au sein et entre les différents réservoirs constitutifs de cette zone (Fig. 6). Une attention particulière devra être portée à ce niveau sur les « hot-spots » réactifs que constituent les interfaces eau – sédiment, minéraux – bactéries – solution ou plante – solution, hot-spots propices *a priori* à la genèse de fractionnements isotopiques et de variations temporelles dans l'expression de ces fractionnements. Pour valider l'utilisation de ces nouveaux traceurs, les mesures sur le terrain devront s'accompagner d'expériences en laboratoire visant à déterminer les mécanismes élémentaires responsables des fractionnements observés et à évaluer le rôle des facteurs du milieu, comme la température ou le pH, sur les fractionnements

d'équilibre ou cinétiques. Comme dans le cas des autres observables de la zone critique, une conceptualisation préalable des fractionnements isotopiques devra précéder l'analyse d'échantillons ou de séries temporelles pour éviter de voir se multiplier des analyses isotopiques coûteuses et complexes sans hypothèses théoriques à tester.

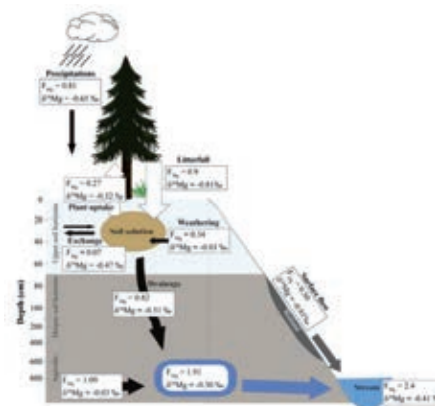


Figure 6. Variations du rapport isotopique du magnésium (noté $\delta^{24}\text{Mg}$) au sein de la zone critique d'un bassin versant. Les variations observées peuvent être utilisées pour quantifier les flux échangés entre compartiments (précipitations, végétation, substrat rocheux, eau profonde, eau de rivière...). Cet exemple illustre le potentiel que représente le développement des outils isotopiques non traditionnels pour étudier le fonctionnement de la zone critique et les réactions et transferts dont elle est le siège. © Boulou-Bi E.B. et al., *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2012

Cette conceptualisation passe par exemple par le développement de modèles numériques de transport réactif incorporant les rapports isotopiques, de tels outils permettant de prédire les fractionnements isotopiques en fonction des conditions aux limites du système considéré. Compte tenu de son investissement historique en géochimie isotopique, la communauté scientifique française se doit de tenir une place de premier rang dans le développement de ces nouveaux outils. Le concept de zone critique offre un terrain idéal dans cette recherche de performance, en favorisant les échanges indispensables, aussi bien entre géochimistes « isotopistes », hydrologues, géomorphologues et (micro)biologistes qu'entre modélisateurs, expérimentateurs et analystes de terrain.

• Mieux prendre en compte la composante « horizontale » de la zone critique

Le concept de zone critique ne saurait se réduire à l'échelle verticale d'un sol ou d'un aquifère. Les bassins versants - la surface de la Terre de manière générale - sont le siège de transferts latéraux de matière qui prennent différentes formes selon leurs échelles caractéristiques.

Les bilans globaux ne peuvent faire l'économie de l'étude de ces réservoirs latéraux et des transferts horizontaux plus ou moins transitoires associés. La dynamique de ces transferts est tout aussi importante pour leur réactivité et leur implication dans les cycles biogéochimiques, que pour la propagation et l'impact sur la biodiversité des polluants et autres micro-organismes. Les plaines d'inondation, par exemple, sont des endroits particuliers, historiquement toujours appréciés par les civilisations humaines et caractérisés par l'importance des couplages hydrologiques, géomorphologiques, biologiques et géochimiques dont ils sont le siège, couplages dont le détail et l'impact sur les flux et bilans de matière restent cependant encore très mal connus. Les zones humides de tête de bassin entrent également dans cette catégorie des réservoirs latéraux. Elles créent un continuum réactif entre le réseau hydrographique et les zones bien drainées de versants

avec le développement en leur sein de réactions biogéochimiques particulières (dénitrification, méthanisation, bio-réduction des oxydes métalliques...).

La réponse et donc la vulnérabilité de ces systèmes à des perturbations anthropiques ou naturelles ne sont pas établies, et encore moins prédictibles par des modèles. Aux frontières des zones continentales, les estuaires et deltas sont des cas extrêmes vis-à-vis du transport et de la réactivité, sur lesquels la communauté doit se mobiliser (Fig. 7). Comme le lien entre eaux de surface et eaux profondes à l'échelle d'un bassin versant, le continuum fleuve – estuaire – océan est une frontière importante dont le fonctionnement reste pour une grande part inconnu. La question de la réactivité et du fonctionnement de ces extensions horizontales particulières de la zone critique recoupe pour une part la question détaillée plus haut des « hot spots » réactifs.



Figure 7. Les zones de delta (ici le delta de l'Okavango au Botswana) constituent des extensions latérales de la zone critique, marquées par des transferts latéraux importants de matière. Les matériaux stockés dans ces systèmes subissent des transformations liées aux changements des conditions aux limites. Les mécanismes en jeu dans ces transformations et l'amplitude des flux échangés restent pour une grande part à élucider et quantifier. © Justin Hall from Culver City, USA (<http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/deed.fr>)

• Mieux prendre en compte le couplage avec la végétation et l'atmosphère

Venu principalement du monde de la géophysique et de l'hydrologie, le concept de zone critique n'a encore qu'insuffisamment percolé vers les communautés de la surface (écologues, microbiologistes) et de la basse atmosphère (micrométéorologistes). Ces dernières sont pourtant habitués depuis longtemps à traiter du continuum sol – plante – atmosphère, mais sans toujours prendre en compte de façon explicite les interactions avec les couches plus profondes, que ce soit par la mesure ou *a fortiori* par la modélisation. Les géophysiciens, de leur côté, ne voient souvent dans les zones d'interface avec l'atmosphère que la limite de leur système, où imposer des conditions d'entrée-sortie. Une meilleure prise en compte des zones superficielles de la zone critique et de leurs couplages avec l'atmosphère ne comporte pourtant que d'évidents avantages. En voici trois exemples illustratifs :

- les études de long terme, qui connaissent une poussée spectaculaire avec le développement de la recherche sur les changements globaux, nécessitent par essence de prendre

en compte tous les couplages forts existant entre sous-sol, sol, végétation et atmosphère; sans cette prise en compte, un certain nombre de processus interactifs ne pourraient être traités de manière satisfaisante (stockage et émission du carbone par exemple);

- aux échelles dites intermédiaires (mésos et sub-mésos-échelles, échelle du paysage), la complexité des processus et des couplages est maximale, d'autant que c'est à ces échelles que l'action anthropique prend tout son poids; l'occupation du sol exerce un effet majeur et les transferts horizontaux évoqués précédemment peuvent avoir un fort impact sur les bilans de matière;
- pour être complète et permettre un bouclage de ces bilans, l'instrumentation de la zone critique ne peut se passer de systèmes de mesures des flux atmosphériques qui mettent en jeu des mâts ou tours de mesure, voire des réseaux de tels instruments dès lors que le terrain est un tant soit peu complexe; la modélisation atmosphérique à fine échelle peut également venir en aide au dimensionnement des systèmes et à l'interprétation des données.

Fonctionnement multi-échelles et évolution des écosystèmes continentaux et littoraux sous contraintes « naturelles » ou anthropiques

Dans les écosystèmes continentaux, la dynamique des fluides et des nutriments ainsi que les conditions de forçages physiques jouent un rôle fondamental sur la répartition spatiale et temporelle des activités biologiques. Les organismes et les communautés impactent les processus qui modèlent la surface de la Terre et contrôlent la dynamique de ces différents flux (Fig. 1). Néanmoins, le déterminisme et les facteurs de contrôle de ces rétroactions entre milieu et organismes sont loin d'être compris du fait notamment des difficultés rencontrées dans l'intégration des approches couplant un grand nombre de disciplines que cette compréhension requiert. Celle-ci passe en effet par le développement de recherches aux interfaces entre physique (géomorphologie, mécanique des fluides), chimie (qualité de la matière organique, substances émergentes...), biologie moléculaire (expression des gènes, adaptation génomique...) et écologie (microbiologie fondamentale, dynamique des populations et des communautés), mises en œuvre en synergie sur des objets

naturels ou expérimentaux. La compréhension des interactions entre milieux et organismes vivants, interactions éminemment complexes et fortement variables dans le temps et l'espace, ne pourra se faire sans le recours régulier à la modélisation et au développement de nouvelles méthodes numériques capables de prendre en compte ces variabilités et complexités. La mise en œuvre et le développement de ces orientations de recherche devraient conduire à mieux appréhender les déterminismes à l'origine de la structure, du fonctionnement et des services rendus par les écosystèmes continentaux et leurs interfaces, dans le contexte des changements socio-environnementaux en cours.

Le fonctionnement des écosystèmes est dépendant des interactions multi-échelles entre leurs constituants biotiques et abiotiques. Un bon exemple est fourni par le compartiment matière organique du sol (MOS) qui joue un rôle primordial au sein des écosystèmes terrestres et, au-delà, au sein des surfaces continentales dans leur ensemble. Ce compartiment



Figure 1. Rivière Sabie, Afrique du Sud. Comment quantifier les interactions entre végétation riveraine et hydrogéomorphologie ? © ECOBIO, Gilles Pinay

Fonctionnement multi-échelles et évolution des écosystèmes continentaux et littoraux sous contraintes « naturelles » ou anthropiques

a en effet la capacité de réguler le climat *via* sa fonction puits ou source de CO₂, mais aussi d'autres gaz à effet de serre (N₂O, CH₄...). Alors que des progrès considérables ont été réalisés ces dernières années dans la caractérisation des cortèges moléculaires qui composent ce compartiment et sont impliqués dans sa dynamique, les interactions complexes existant entre le compartiment MOS, la végétation et la biomasse microbienne du sol, ainsi que les contrôles qu'exerce en retour ce compartiment sur la biodiversité de l'écosystème sol, demeurent très peu connus. Malgré des avancées importantes, les processus conduisant à la stabilisation à long terme des MOS ne sont également que partiellement élucidés. S'il est de plus en plus clair aujourd'hui que la « récalcitrance » biogéochimique n'est pas le processus clé, il reste encore à décrypter dans le détail les processus alternatifs de protections physiques et physicochimiques. La MOS est aussi la principale source de carbone organique transféré vers les eaux de surface. La caractérisation des formes de ce carbone organique et la quantification des flux allant des écosystèmes terrestres vers les écosystèmes aquatiques demeurent des enjeux majeurs pour l'évaluation des effets de ces transferts sur le cycle global du carbone et les fonctions écologiques associées.

À ce jour, l'écologie a traité principalement de l'influence des conditions du milieu (édaphiques, hydrologiques, climatiques...) sur les communautés microbiennes, animales et végétales, et très peu de l'influence de ces communautés sur les conditions du milieu. Pourtant, les organismes vivants agissent souvent de manière très significative, voire toujours pour les micro-organismes et les processus biogéochimiques, sur les milieux et leurs propriétés. Ils peuvent par exemple modifier l'hydrodynamique des milieux aquatiques : réduction des échanges entre eau libre et eau interstitielle par les biofilms autotrophes et hétérotrophes, réduction des phénomènes de colmatage par les organismes ingénieurs, et modification des contraintes hydrodynamiques par la végétation. On commence également à entreprendre le rôle joué par les espèces ingénieurs sur la dynamique sédimentaire et les conséquences que la sélection naturelle opérant sur ces espèces peut avoir sur les composants physiques des écosystèmes terrestres, comme les processus d'érosion et, *in fine*, la dynamique et l'évolution des reliefs. En retour, il apparaît aussi de plus en plus évident que les processus géomorphologiques induits par l'activité biologique se nourrissent eux-mêmes des caractéristiques écologiques propres à l'écosystème (structure et fonction) et des caractéristiques biologiques intrinsèques des espèces ingénieurs considérées (spécialisation, capacité d'adaptation...). Outre des modifications des propriétés physiques des milieux, les actions biologiques induisent souvent des modifications profondes des processus biogéochimiques comme ceux impliqués dans les capacités auto-épuratrices des milieux (recyclage de la matière organique, dénitrification, dégradation des polluants organiques, bio-remédiation). La prise

en compte du fonctionnement des écosystèmes à toutes les échelles est fondamentale pour pouvoir évaluer comment ces actions des organismes vivants sur les milieux et les propriétés et fonctions qui en découlent seront modifiées dans le contexte du changement global (changements climatiques : augmentation des températures, modification du cycle hydrologique, intensification des événements extrêmes... ; changements anthropiques : modification de l'occupation des sols, changement de pratiques agricoles en réponses aux changements climatiques, changement d'usages, contaminations...) et quelles seront les conséquences de ces modifications sur le fonctionnement, la durabilité et les services rendus par les écosystèmes.

Nous disposons désormais d'outils permettant d'élucider les processus écologiques à l'œuvre à l'échelle d'individus aussi petits que les microbes, du point de vue tant de la biologie que de la physique ou de la géochimie. Toutefois, ces approches, aussi novatrices soient-elles, n'en sont qu'à leurs premiers stades de développement et ne sont en général que très rarement associées à des études de génomique. Il apparaît également nécessaire de renforcer, dans le cadre de telles études, le lien entre les processus écologiques à petite échelle et le fonctionnement à plus grande échelle de l'écosystème, grâce à la mise au point d'outils d'observation, d'expérimentation et de modélisation permettant de relier les échelles entre elles. Des techniques d'imagerie 3D par tomographie de rayon X couplée à du marquage isotopique sont par exemple envisageables pour analyser les interactions entre communautés microbiennes et structure et propriétés physiques du sol. Il semble également utile d'associer et/ou développer un cadre théorique permettant de prendre en considération l'échelle microscopique dans les processus observables aux échelles macroscopiques, en d'autres termes, de formaliser l'emboîtement des échelles spatiales.

Pour limiter l'effet de variables confondantes, les approches expérimentales visant à comprendre le rôle des (micro)organismes dans les écosystèmes est envisagée en systèmes simplifiés avec comme conséquences négatives possibles le fait que ces approches soient souvent réductionnistes ou que l'aspect dynamique ne soit pas toujours pris en compte. Par opposition, les approches de terrain, cible ultime, ne sont pour l'instant pas utilisables du fait de la multiplicité des facteurs impliqués et de notre incapacité à isoler leurs effets individuels. Les approches expérimentales intermédiaires de type mésocosme qui se développent actuellement sont à encourager, en complément des précédentes. Elles permettent d'affiner progressivement les systèmes étudiés dans des dispositifs de petite taille, d'étudier les paramètres impliqués dans les fonctionnements observés et de valider les hypothèses émises suite aux observations de terrain. Il faut néanmoins souligner la nécessité d'un maintien de tels dispositifs sur des durées souvent supérieures à celles

d'un projet de recherche. Assurer ce maintien de mésocosmes originaux (voir le dernier paragraphe) est impératif. Permettre à la communauté d'accéder aux mésocosmes existants semble également être un enjeu à ne pas négliger. Produire de nouveaux mésocosmes accessibles à la communauté est sans doute assez réaliste. Un exemple parmi d'autres consisterait à mettre en place des rivières expérimentales à l'échelle nationale, lesquelles pourraient permettre de comprendre les relations entre physique, hydrodynamisme et processus écologiques propres à ces systèmes, avec un degré de complexité réaliste (hétérogénéité physique des fonds, diversité des espèces impliquées, etc.).

Un des enjeux majeurs en écologie fonctionnelle est d'évaluer comment des processus biologiques microbiens se déroulent à l'échelle du microsite, tels que ceux impliqués dans les cycles biogéochimiques, se manifestent à l'échelle de zones d'interaction de dimensions plus grandes. Réciproquement, il est très difficile d'appréhender comment des contraintes physiques et structurales perceptibles à l'échelle du paysage peuvent influencer des processus se déroulant à l'échelle du microsite (Fig. 2). Les nouvelles avancées technologiques, que ce soit en imagerie spatiale (par exemple le LIDAR topographique), en géochimie (par exemple les proxys de processus) ou en génomique environnementale (par exemple le séquençage de méta-génomés ou de méta-transcriptomes, quantification d'expression de gènes, etc.), permettent d'envisager des solutions. Quelles qu'elles soient, ces approches doivent être croisées et donc interdisciplinaires. Il est de fait assez classique que les variables de forçage proximales d'un processus à une échelle spatio-temporelle donnée soient contraintes par des variables distales d'une autre nature, l'ensemble nécessitant alors d'interpeller des concepts et outils relevant d'une ou plusieurs autres disciplines.

Les écosystèmes continentaux sont des systèmes complexes, traversés par des flux multiples d'eau, de matière vivante et inerte et de contaminants. La prise en compte du rôle des propriétés et du fonctionnement de la totalité de ces systèmes, ou des zones d'interface qui les traversent et les délimitent, sur les flux



Figure 2. Paysage bocager breton (zone atelier Armorique). Comment quantifier les interactions entre structure des paysages, biodiversité et qualité de l'eau ? © ECOBIO, Gilles Pinay

qui les traversent ne peut être réalisée qu'en ayant recours à des approches de modélisations, numériques et analogiques, associées à de l'assimilation de données. De ce point de vue, le développement de nouvelles approches en modélisation de ces systèmes complexes est extrêmement important et doit se poursuivre sous deux angles: la réduction de la complexité, qui est une démarche autant théorique (homogénéisation, changement d'échelle) que numérique, et le développement de nouvelles méthodes de calcul massivement parallèles. De la même manière, en ce qui concerne l'analyse des données, la grande variété des informations collectées ainsi que la complexité des processus mis en jeu rendent indispensables la définition de méthodes d'analyse de données alternatives (couplage avec des modèles mécanistes et inversion, gestion d'informations variées...). Enfin, la multiplication des informations numériques produites (cartographie 2D de la microtopographie, tomographie 3D haute-résolution, analyse en continu de variables physicochimiques...) pose le problème de leur visualisation. Il devient alors nécessaire de mettre au point des techniques adaptées, notamment en ré-analysant toutes les données en vue de faciliter leur visualisation et interprétation.

Afin de prendre en considération les effets des variables de forçage (pulses ou pressions) sur le fonctionnement des écosystèmes, nous devons également être capables de prévoir dans quelle mesure ces écosystèmes et les organismes qui les composent vont pouvoir s'adapter ou évoluer aux échelles considérées. Si d'un point de vue théorique, grâce par exemple à l'usage de modèles, nous sommes capables d'entrer ces composantes d'adaptation et d'évolution dans les prévisions, nous sommes toutefois face à un enjeu de validation des modèles au moyen de données montrant, *in vivo* (ou *in situ*), comment les écosystèmes s'adaptent ou réagissent aux pulses et pressions qu'ils subissent. Réussir cette validation *in vivo* passe clairement par la pérennisation des systèmes d'observation à long terme.

Les liens entre fonctionnement des écosystèmes et fonctionnement de la société humaine sont au cœur des réflexions sur les interactions entre milieux et organismes vivants et sur le rôle de ces interactions sur le fonctionnement et les services rendus par les écosystèmes. Des progrès récents, réalisés par exemple dans le cadre des LTER américains (Long-term ecological research networks), permettent d'intégrer le fonctionnement des écosystèmes et celui de(s) (la) société(s) humaine(s) dans un cadre théorique unique. Cette avancée majeure permet désormais de développer des hypothèses de fonctionnement relevant à la fois des sciences humaines et sociales et des sciences de la nature. La généralisation de telles approches peut permettre d'éviter le piège consistant à juxtaposer sciences humaines d'un côté et sciences physiques et naturelles de l'autre, sans réelle communication ni plus-value commune dans un contexte où l'enchevêtrement des variables de pression naturelles et anthropiques ne cesse de s'accroître.

Dynamique des éléments et des contaminants, physicochimie des interfaces, biogéochimie, écotoxicologie

Au sein de la zone critique, le devenir des éléments et des contaminants est, pour l'essentiel, contrôlé par des interactions complexes et multiples avec les constituants fluides, minéraux, organiques et vivants. Sous le terme de « contaminants » sont inclus les composés chimiques d'origine anthropique ou naturelle, mais également les agents biologiques pathogènes ou produisant des toxines. Dans une optique de développement durable, les éléments nutritifs doivent également être considérés.

Dans le contexte écodynamique, le devenir des éléments et des contaminants recouvre non seulement leur distribution spatiale et temporelle, mais aussi les modifications de leur forme chimique et structurale (spéciation). L'écodynamique des contaminants est une question en partie couverte par l'analyse des flux (voir le chapitre « Flux de matière et d'énergie... »). Il apparaît toutefois essentiel de renforcer les connaissances relatives aux couplages entre les processus physiques, chimiques et biologiques agissant au sein d'un même compartiment et à leurs conséquences en termes de flux et de bilans. Il est en effet fondamental d'intégrer la dynamique des vecteurs de transfert des éléments et contaminants, souvent considérés comme immobiles, pour modéliser leur devenir. En

effet, le devenir des contaminants conditionne leur disponibilité, leurs effets sur le vivant – y compris l'homme – ainsi que leurs conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes. Mais les organismes vivants affectent aussi directement les contaminants. La compréhension des mécanismes biotiques et abiotiques contrôlant la dynamique et l'impact des contaminants à grande échelle (paysage, bassin versant...) est donc un enjeu majeur dans le contexte des services écologiques (préservation, altération, remédiation). Cet enjeu requiert d'être capable de modéliser les processus impliqués et leurs facteurs de contrôle, c'est-à-dire d'en décrypter le fonctionnement à l'échelle la plus élémentaire. Les mécanismes moléculaires impliqués se répercutent en effet à tous

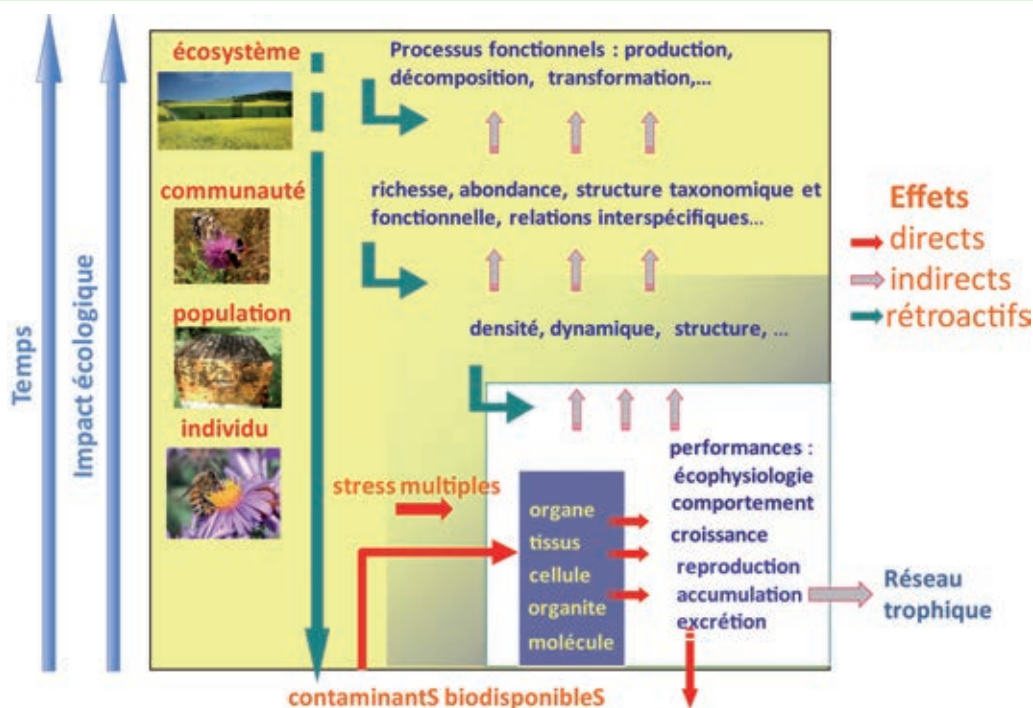


Figure 1. Représentation conceptuelle des effets des contaminants aux différentes échelles d'organisation du vivant, de l'individu à l'écosystème.

les niveaux de l'organisation biologique, jusqu'à la modification du fonctionnement des écosystèmes et de la biosphère, *sensu lato*. Une compréhension à l'échelle moléculaire permet de minimiser la perte d'information lors des nécessaires changements d'échelles spatiales ou temporelles. Elle s'appuie sur des connaissances en physicochimie des interfaces et en biogéochimie et fait également appel aux disciplines de la biologie, en particulier la physiologie, l'écologie et l'écotoxicologie, pour ce qui concerne les interactions avec et entre les systèmes biologiques. Enfin, dans la zone critique, l'homme est non seulement la cible directe des contaminants en tant que maillon terminal des réseaux trophiques, mais aussi le responsable des causes, des conséquences et des décisions en tant qu'agent de remédiation et de gestion (Fig. 1).

■ Limites des approches actuelles et verrous à lever

L'une des difficultés rencontrées dans l'étude de la zone critique réside dans son hétérogénéité « dynamique », source de biodiversité, et dans la complexité existant à toutes les échelles. Cette hétérogénéité limite notre capacité à reproduire expérimentalement et à modéliser les processus naturels qui s'y déroulent. Dès lors, il apparaît donc particulièrement pertinent :

- de mieux utiliser les observations faites aux échelles les plus larges pour identifier les impacts aux échelles les plus fines, afin de décrypter les mécanismes et de les intégrer dans la dynamique d'évolution des systèmes ;

- d'effectuer des allers-retours entre les observations *in situ* et les études de systèmes analogues simplifiés, pour mieux orienter les expérimentations en laboratoire ;
- de hiérarchiser les processus impliqués sur la base des lois physiques qui les contrôlent, pour fonder l'approche modélisatrice de la façon la plus pertinente possible ;
- d'intégrer l'organisation biologique afin de comprendre et modéliser les mécanismes moléculaires d'interaction des contaminants avec le vivant et les transferts entre les différents niveaux trophiques ;
- d'évaluer, par des approches de modélisation mécanistique, les conséquences de ces mécanismes à des niveaux d'organisation supérieurs (dynamique des populations, dynamique des communautés, processus fonctionnels) ;
- de prendre en compte les réseaux d'interactions biotiques et abiotiques contribuant au fonctionnement des écosystèmes ;
- de gérer les changements d'échelles spatiales, et en particulier d'améliorer la description à l'échelle du millimètre ou centimètre qui est celle de l'homogénéisation, dans l'optique d'établir des bilans quantitatifs ;
- de prendre en compte les aspects dynamiques ainsi que les rythmes saisonniers et biologiques et leurs incidences sur la cinétique de spéciation des éléments.

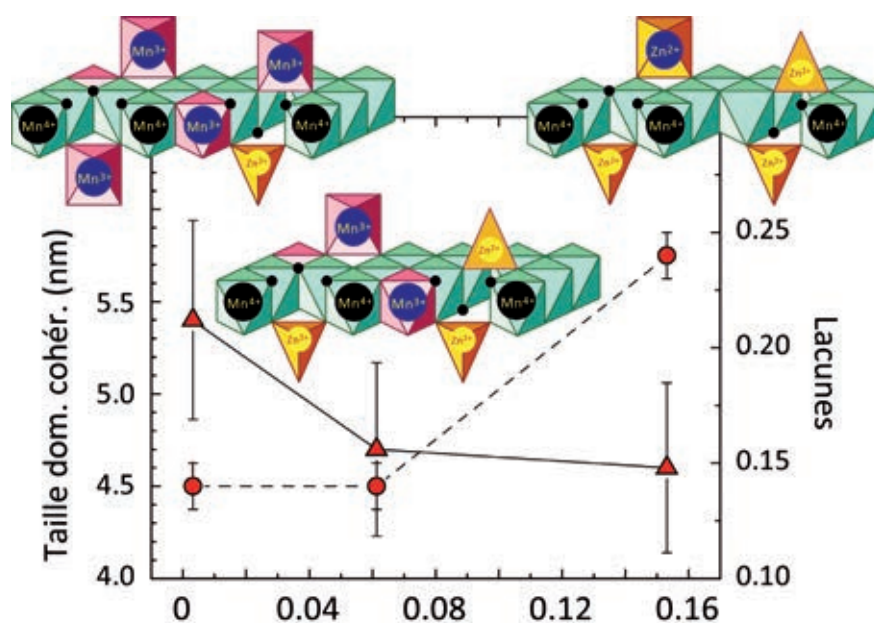


Figure 2. Évolution de la structure d'un phyllomanganate nanocrystallin lors de la sorption de Zn. La diminution de la taille des domaines cohérents de diffraction (triangles) et l'augmentation de la densité de lacunes octaédriques (cercles) conduisent à une augmentation de la densité de sites de sorption et à leur autocatalyse. © Grangeon et al., *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013

Le prérequis indispensable à une meilleure compréhension des processus contrôlant la dynamique des éléments dans la zone critique réside dans notre capacité à en décrire les composants actifs et à déterminer leurs propriétés vis-à-vis des éléments et contaminants pertinents ainsi que leur organisation. Cette description reste parfois limitante, en particulier pour ce qui concerne les minéraux cryptocristallins (argiles, colloïdes, nanoparticules naturelles, etc.) et les liens entre leur structure, leurs propriétés de surface et leur réactivité (Fig. 2). Il est aussi nécessaire d'améliorer notre connaissance de la structure, de la composition chimique et de la dynamique des matières organiques naturelles, en particulier des fractions macromoléculaires (les interactions avec les molécules simples étant mieux documentées). Les associations entre ces deux composants majeurs au sein d'assemblages (nano-)particulaires multiphasiques (le « complexe argilo-humique ») restent imparfaitement connues et requièrent un travail spécifique, pour notamment déterminer leur impact en terme de surface spécifique, réactivité ou micro-habitat. Enfin, la compréhension des interactions avec le vivant (virus, bactéries, archées, champignons, plantes, animaux, mais aussi son organisation en réseaux d'interactions) comme composant actif et surface active de la zone critique reste insuffisante.

De plus, ces composants de la zone critique sont souvent considérés comme immuables, alors que les changements d'usage et les modifications des flux élémentaires, en particulier des nutriments et des contaminants, vont agir sur les diversités minérales, organiques et biologiques et donc sur leurs interactions et sur les processus fonctionnels qui en résultent. Ces modifications se produisent à différentes échelles de temps. Il est donc nécessaire de pouvoir dater les évolutions lentes et/ou anciennes, mais également de suivre les évolutions plus rapides (ponctuelles, journalières ou saisonnières) engendrées par le changement des conditions physicochimiques, par les cycles de culture ou plus généralement par les cycles de vie des plantes et organismes. Dans la perspective de prise en compte des évolutions lentes, l'étude d'analogues naturels peut permettre de mieux comprendre, sinon les processus d'évolution, du moins le devenir ultime des éléments et des contaminants dans un système naturel complexe, et donc de mieux cibler les systèmes et les processus pertinents. L'utilisation de traceurs isotopiques ou géochimiques permet également de mieux prendre en compte la dynamique de ces systèmes. Enfin, le couplage entre cycles hydrologiques, intégrant le transport colloïdal, et cycles biogéochimiques permettra d'appréhender la dynamique de transfert des éléments et des contaminants. Les couplages entre processus physiques, chimiques et biologiques agissant au sein d'un même compartiment demeurent une problématique cruciale (cf. thème « Flux de matière et d'énergie... »). De la même manière, le passage des observations aux très petites échelles (nano ou micro, moléculaire ou individus pour le vivant) vers des

échelles intermédiaires (mm ou cm, populations ou communautés pour le vivant) ou plus vastes (bassins versants, écosystèmes) reste une question ouverte qui devra être abordée.

Les travaux menés cette dernière décennie se sont généralement focalisés sur le devenir d'un nombre restreint de contaminants inorganiques ou de familles de composés organiques, en éludant souvent les possibles interactions entre les différents contaminants présents (effet « cocktail »). Les contaminations multiples sont pourtant la règle bien plus que l'exception et les interactions et compétitions entre contaminants sans nul doute cruciales, aussi bien sur les dynamiques que sur les effets. La multiplicité de ces interactions est d'autant plus difficile à étudier que la pollution est diffuse et que les formes multiples des intrants s'additionnent à celles du fond géochimique. Il convient donc d'accroître la sensibilité chimique et la résolution spectrale des outils analytiques pour mieux discerner chacun des contaminants, déterminer leur forme, en relation avec leur bioaccumulation et le risque présenté, et tracer leurs sources. L'étude du devenir de contaminants inorganiques spécifiques (métalloïdes, terres rares, par exemple) ou des nanoparticules manufacturées, souvent présents en (très) faibles teneurs, nécessite également de tels développements. Les contaminants organiques émergents, tels que les médicaments ou les perturbateurs endocriniens, ainsi que leurs produits de dégradation représentent également un défi analytique et sociétal majeur. Dans tous ces cas, les interactions entre contaminants, et le cas échéant leur spécificité par rapport aux formes préexistantes, doivent être prises en compte pour mieux apprécier le risque à court terme et évaluer les effets d'atténuation naturelle sur le moyen et le long terme. Enfin, s'il est clair qu'un effort particulier doit porter sur les contaminants dans l'optique d'une évaluation du risque, les éléments nutritifs doivent également être considérés. La biodisponibilité des nutriments pour la croissance végétale est un facteur particulièrement sensible pour les sols naturellement pauvres ou appauvris suite à une perturbation engendrée par le changement climatique, mais aussi les multi-contaminations, le tassement, la perte de biodiversité, etc.

Concernant le fonctionnement des écosystèmes, les contaminants doivent être considérés comme des variables de forçage, quelle que soit l'échelle d'observation considérée, tout en incluant les réseaux d'interactions. La mesure et l'observation de l'écodynamique des contaminants (du moléculaire aux bassins versants) doit permettre de mieux comprendre le fonctionnement écologique des systèmes anthropisés et d'apporter des éléments exploitables en termes de remédiation. Les concepts théoriques et les outils d'investigation des différentes communautés scientifiques (biogéochimie, écotoxicologie, écologie, physiologie, ingénierie de l'environnement, etc.) doivent être confrontés.

Pour des raisons historiques liées à son émergence, la recherche en écotoxicologie évolue vers une plus grande interdisciplinarité et se structure au niveau national. Cette ouverture est à poursuivre et à encourager afin de progresser dans «l'upscaling» et le «downscaling» des données aux différents niveaux d'organisation du vivant. Des forces existent en France en écologie fonctionnelle et en écologie théorique qui devraient s'intéresser au cours des prochaines années à l'impact des contaminants en association avec d'autres stress physiques (e.g., température), alimentaires ou biotiques (prédation, parasitisme, toxines). La recherche en écologie chimique doit contribuer à cette démarche en produisant des connaissances sur les molécules de communication entre organismes ou systèmes biologiques et en s'intéressant aux interactions de ces molécules avec les contaminants. Un des points clé sera de passer d'un contaminant considéré seul et évalué pour un écosystème standard, à une analyse territorialisée de la vulnérabilité des écosystèmes intégrant les multiples facteurs de stress (abiotiques et biotiques). Pour cela, il est important de développer des approches «top-down» et multi-échelles, de prendre en compte les multi-contaminations à des niveaux et temporalités représentatifs des conditions réelles et d'étudier les relations entre les facteurs de stress et les contaminants.

Un des obstacles théoriques et méthodologiques clés au développement de modèles de transferts mécanistiques réside actuellement dans les changements d'échelle temporelle, spatiale ou démographique. Dans le contexte de la vulnérabilité des écosystèmes, l'exploration de nouvelles voies de modélisation est nécessaire pour permettre de coupler des modèles d'effets fondés sur les processus opérant aux niveaux sub-individuel et individuel à des modèles de dynamique de populations, de dynamique de communautés et de dynamique écosystémique jusqu'aux bassins versants. L'étude du transfert et de l'effet des contaminants aux interfaces entre milieux (terrestre et aquatique, atmosphérique et océanique...) apparaît ainsi particulièrement pertinente. Afin d'obtenir des modèles génériques à fort pouvoir prédictif, il faut viser en priorité la compréhension du fonctionnement des systèmes complexes considérés, plutôt que leur description extensive. La modélisation doit aussi répondre à des questions telles que la prise en compte de la variabilité et de l'incertitude dans l'estimation des paramètres des modèles, la prédiction et l'extrapolation des résultats d'un niveau d'organisation à l'autre ou la définition d'indices de risque au niveau populationnel ou communautaire. Ainsi, elle doit s'attacher à la définition de grandeurs caractéristiques en termes de santé démographique des populations, des communautés et des écosystèmes qui soient indépendantes du protocole expérimental choisi.

Enfin, les marqueurs biologiques reflétant les mécanismes d'effet les plus précoces se situent au niveau sub-individuel. Leur étude se décline notamment en sciences «omiques»

(génomique, transcriptomique, protéomique, métabolomique) qui permettent des avancées mécanistiques sur des modèles pertinents. Si ces nouvelles technologies génèrent une importante quantité de données «méta-omiques» en un temps réduit, leur traitement et leur analyse posent toutefois de nombreux problèmes algorithmiques, mathématiques et statistiques qui limitent actuellement leur exploitation en vue d'une meilleure compréhension du fonctionnement des écosystèmes, mais sur lesquels des progrès sont attendus.

■ Des pistes et des outils pour le futur

Les études menées dans la zone critique sont trop souvent monodisciplinaires ou découplent les différents compartiments. L'un des objectifs fondamentaux est donc de réunir sur un même site, ou autour d'objets ou de processus communs, des compétences diverses permettant la pluridisciplinarité qu'impose la complexité des systèmes étudiés. Cette pluridisciplinarité a été encouragée ces dernières années dans la programmation EC2CO, ou au niveau des SNO du CNRS-INSU, des ZA du CNRS-InEE et des SOERE du ministère de la Recherche. Parallèlement à la compréhension des processus aux différentes échelles, en particulier aux temps longs qu'autorisent les systèmes d'observation pérennes, il apparaît également pertinent de s'intéresser au développement de solutions visant à la remédiation de milieux contaminés ou d'écosystèmes impactés, en intégrant notamment les phénomènes de résilience observés dans les systèmes naturels. À cet effet, la coordination des appels d'offres serait à améliorer entre les différents organismes et agences impliqués (ANR, ANSES, ADEME, par exemple). La mise à disposition de la communauté des résultats sous forme de bases de données partagées et la conservation des échantillons collectés doivent également permettre de conforter la valorisation de ces différents systèmes d'observation (Fig. 3).

En ce qui concerne le premier objectif qui est de réunir des disciplines, le regroupement de communautés historiquement éloignées, comme l'écologie et la géochimie, au sein du domaine SIC du CNRS-INSU et de la section 30 (anciennement 20) du CNRS a favorisé les interactions entre ces communautés et renforcé la visibilité de la thématique SIC aux niveaux national et international. L'ouverture vers la santé et les sciences de l'homme et de la société est probablement l'étape suivante de cette démarche visant à une pluridisciplinarité renforcée. Il apparaît en particulier nécessaire de cibler une part de l'effort sur les écosystèmes urbains ou péri-urbains, avec des problématiques différentes au nord et au sud.

Au cours de la dernière décennie, une large palette d'instruments a été développée pour décrire et comprendre la dynamique

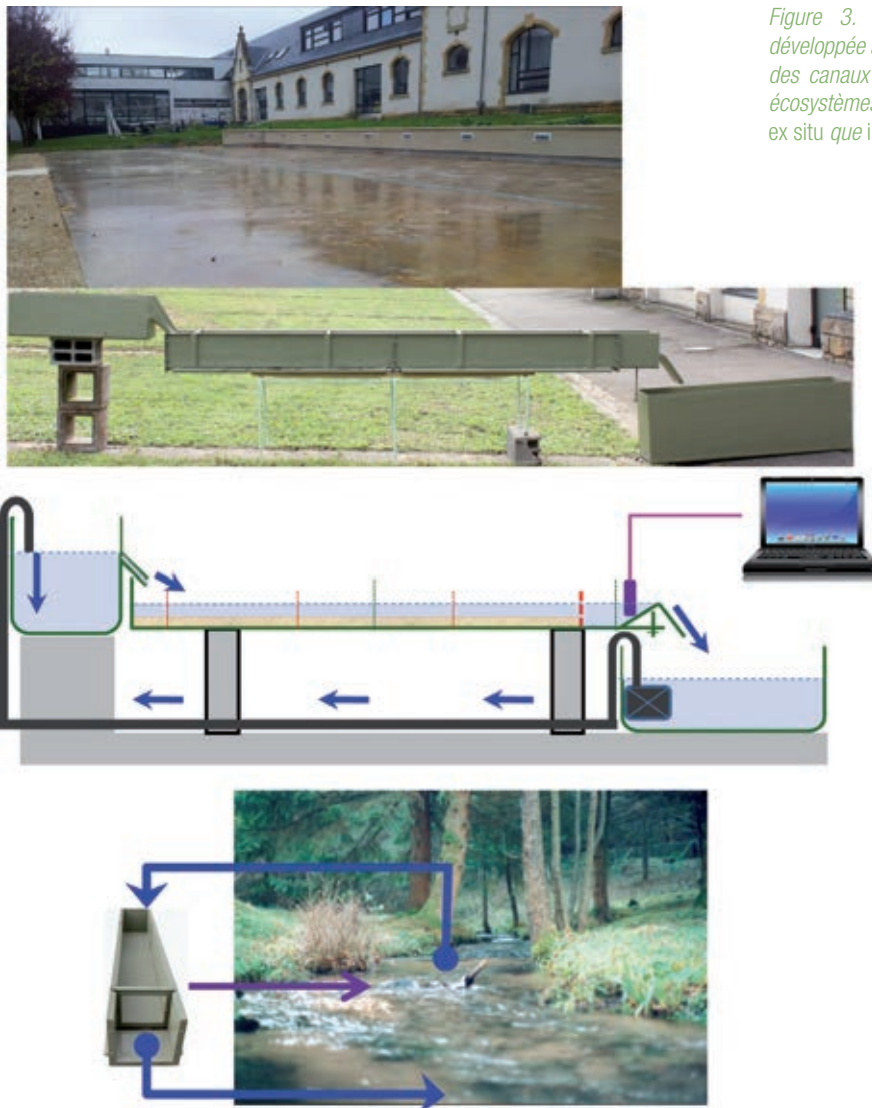


Figure 3. La plateforme expérimentale EcoScope développée au sein de la zone atelier Moselle comprend des canaux expérimentaux permettant de simuler les écosystèmes lotiques et pouvant être utilisés aussi bien ex situ que in situ.

des éléments et des contaminants. Ainsi, les outils spectro-microscopiques permettent désormais d'obtenir, avec une résolution sub-micrométrique, les caractérisations physiques et chimiques anciennement limitées aux seuls échantillons macroscopiques. Ils permettent également aujourd'hui de faire un bilan de la distribution et de la spéciation de contaminants (métaux, métalloïdes) dans un milieu hétérogène. De telles techniques sont efficaces non seulement pour comprendre les interactions solide – solution dans des systèmes « analogues » et contrôlés, mais aussi pour étudier les interfaces minéral – vivant et les compartiments biologiques aux échelles tissulaires et cellulaires. L'émergence de techniques d'imagerie mieux résolues spatialement (nano-SIMS, techniques synchrotron utilisant des nano-faisceaux, microscopie électronique en transmission et spectroscopies associées) vont permettre d'aller plus loin en permettant de sonder les interfaces à l'échelle nanométrique et les compartiments sub-cellulaires (Fig. 4). Ces progrès, à soutenir, vont cependant de pair avec la maîtrise de techniques de préparation des échantillons assurant la

préservation conjointe de leur ultrastructure et de la spéciation des éléments. L'amélioration de la résolution spectrale ouvre également de larges perspectives pour mieux comprendre les changements de spéciation des éléments présents à des niveaux diffus de concentration dans les matrices complexes et/ou organiques. L'étude des contaminants organiques et autres xénobiotiques, qui repose pour l'heure sur des techniques couplées impliquant la séparation (chromatographie) et la détection par spectrométrie de masse, reste fortement dépendante des développements méthodologiques (e.g., spectrométrie de masse haute résolution). Le suivi des contaminants organiques est également tributaire de la compréhension des séries de réactions de dégradation, et donc de l'identification, de la détection et de la quantification des composés secondaires ainsi produits, mais également de la quantification des métabolites, éventuellement volatils ou gazeux, et de la détermination du potentiel toxique de ces nouveaux contaminants. Le développement d'une méthode analytique spécifique est ici essentiel.

Parallèlement à ces techniques d'analyse et d'imagerie chimique et structurale, des méthodes électrochimiques spécifiquement dédiées à une meilleure perception de la dynamique de la spéciation des éléments métalliques aux interphases colloïdales sont développées. En effet, s'ils ont permis depuis quelques décennies de décrire une partie du fonctionnement abiotique des écosystèmes, les modèles thermodynamiques ont montré leurs limites en matière de couplage avec le vivant et de capacité prédictive. De nouvelles approches visent à comprendre le sens physique des constantes usuelles, en prenant en compte la réalité physique des objets (taille, charge, distribution des sites, propriétés mécaniques...), les échelles du moléculaire au colloïdal

et le couplage transport – cinétique réactionnelle. Les tailles et distances sont liées à des temps caractéristiques de réaction et de transport et il est donc nécessaire de penser en termes de flux et de fluctuations de concentrations locales. Les techniques permettant d'atteindre les gammes temporelles recherchées sont multiples : capteurs DGT (Diffusive gel in thin films) intégrant des temps longs, voltamétrie-chronopotentiométrie, relaxation diélectrique ou sources synchrotron de 4e génération pour les échelles de temps courts.

La modélisation théorique des interactions à l'échelle moléculaire, aux interfaces inorganiques, organiques et biologiques, encore peu développée en France, est également une piste prometteuse pour mieux comprendre les processus et contraindre les modèles aux échelles d'ordre supérieur. L'amélioration de l'accès de la communauté des géochimistes à des moyens de calcul et le développement de stratégies communes de recherche théorique dans le champ de la géochimie des interfaces sont souhaitables.

Des plateformes de génomique et post-génomique performantes existent, mais ces outils sont encore en cours d'évolution et les approches restent coûteuses. Des supports financiers devraient être négociés pour développer ces approches car elles concourent à une meilleure description de la biodiversité (e.g., taxinomique, fonctionnelle et phylogénétique) et de ses altérations, ainsi qu'à une meilleure évaluation de l'impact des contaminants sur l'expression des gènes, des protéines et des métabolites, cette expression ayant des conséquences sur les niveaux supérieurs d'organisation du vivant. La masse de données nouvelles générée par ces approches devrait permettre de faire évoluer nos questionnements, voire d'engendrer de nouvelles interrogations. Pour produire des hypothèses de fonctionnement à partir des séquences obtenues, la métagénomique nécessite aussi de développer des compétences en écologie intégrative et écologie des systèmes.

Enfin, les dispositifs expérimentaux de type micro et mésocosmes ainsi que les plateformes expérimentales sont indispensables à l'élucidation de la plupart des verrous scientifiques évoqués et à la validation des hypothèses générées à partir des observations de terrain. De grands équipements de type Écotron ont également été développés en France ces dernières années. En permettant d'appréhender des degrés de complexité plus élevés que ne le font les mésocosmes qu'ils complètent, ces systèmes expérimentaux permettent de reproduire une large gamme de conditions environnementales (température, conditions hydriques, CO₂, nutriments, contaminants, etc.) en croisant les niveaux de plusieurs facteurs. Enfin, ils rendent possible la mesure précise des principaux flux générés par l'écosystème et donc l'établissement de bilans de matière. Les questions abordées actuellement relèvent essentiellement de l'écologie et impliquent trop peu la dynamique et l'impact des contaminants.

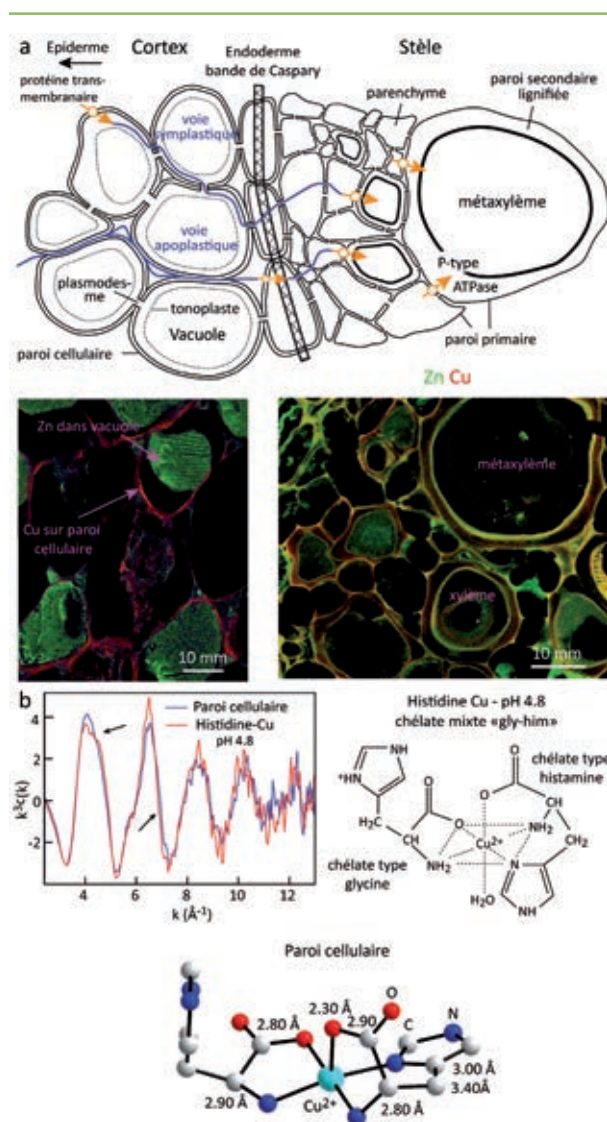


Figure 4. a) Nano-imagerie par fluorescence X de la compartimentation cellulaire et tissulaire de Zn et Cu dans une racine de *Thlaspi arvense* du bassin d'infiltration des eaux pluviales de Django Reinhardt situé à l'est de l'agglomération lyonnaise. b) Spéciation de Cu sur les parois cellulaires par spectroscopie EXAFS et modèles structuraux du complexe double formé avec l'histidine montrant la sensibilité de cette technique à la coordinence du Cu. © Manceau et al., *Metalomics*, 2013

Paléo-environnements

Prendre en compte la profondeur temporelle des processus est une composante fondamentale de l'étude du fonctionnement des surfaces continentales. Ces dernières subissent en effet des modifications à différentes échelles de temps (instantanée, saisonnière, séculaire, millénaire et plurimillénaire). Ces changements peuvent être ponctuels, récurrents, voire cycliques. Dans l'idéal, pour une compréhension complète des processus en jeu, et des paramètres naturels et anthropiques qui les régissent, plusieurs échelles de temps devraient être renseignées simultanément. Or, un hiatus temporel existe entre enregistrements paléo-environnementaux à long terme, couverts au CNRS-INSU par le domaine « Terre Solide » ou le domaine « Océan Atmosphère », et enregistrements instrumentaux des changements de l'environnement, couverts par le domaine « Surfaces et Interfaces Continentales » (SIC). Ce hiatus ne facilite pas l'émergence de travaux portant sur la dynamique des processus aux échelles de temps intermédiaires (100-1000 ans). L'échelle séculaire est pourtant essentielle pour comprendre et modéliser la réponse de l'environnement, incluant surfaces et interfaces continentales, au changement climatique et à la pression anthropique. L'acquisition d'une profondeur temporelle (du siècle à plusieurs dizaines de millions d'années) dans l'observation, la quantification, le traçage et la modélisation des processus modifiant les surfaces et interfaces continentales suppose que plusieurs développements scientifiques soient privilégiés au moyen d'actions structurantes.

■ Développements scientifiques à privilégier

• Encourager la calibration des marqueurs paléo-environnementaux et les expérimentations sur l'actuel

La calibration sur l'actuel des marqueurs paléo-environnementaux est un moyen de contraindre la précision et la justesse des reconstitutions. Elle nécessite de passer par l'expérimentation en conditions naturelles ou contrôlées, qui permet d'établir des relations mathématiques entre les variables environnementales et les marqueurs (fonctions de transfert). C'est lors de cette phase de calibration que sont hiérarchisés les paramètres environnementaux à quantifier et que sont définies les incertitudes associées. Durant cette étape, la mise en commun des outils, techniques et concepts, utilisés dans la recherche des mécanismes actuels de transformation des surfaces et interfaces continentales et dans les reconstitutions paléo-environnementales, doit être encouragée. Dans ce contexte, les collaborations interdisciplinaires, entre géochimistes, biologistes, chimistes, écologues, spécialistes de l'écodynamique des polluants mais aussi archéologues et

historiens, devront être renforcées. En termes d'expérimentation, la multiplication des dispositifs expérimentaux en milieu contrôlé (écotrons, rhyzotrons, mésocosmes), ainsi que le développement des outils et plateformes de génomique qui permettent d'accéder à la diversité microbienne, sont une formidable opportunité (Fig. 1).

Traceurs du fonctionnement des écosystèmes : du paysage à la cellule

En règle générale, les marqueurs des transformations qui affectent les écosystèmes subissent des modifications lors de leur transfert de la source jusqu'au puits (ex. sédiments), et même au-delà, jusqu'à leur exploitation. Or ces transformations restent peu caractérisées. Il est donc nécessaire de développer des approches sources-puits sur l'actuel, ainsi que des approches multi-proxies, associant les marqueurs paléo-environnementaux les plus robustes aux marqueurs en cours de développement. Par exemple, les outils associés au développement de l'écologie moléculaire peuvent être utilisés dans les reconstitutions paléo-environnementales, et offrir ainsi des perspectives de recherche nouvelles (Fig. 2). Ainsi les sédiments lacustres, aux conditions anoxiques, aphotiques et peu acides, permettent la préservation de marqueurs moléculaires tels que l'ADN. Cet ADN sédimentaire est une nouvelle source d'information sur l'évolution des



Figure 1. Culture en chambre climatique de plants de millet permettant de comprendre l'influence des paramètres environnementaux sur la composition isotopique des matières et molécules organiques. © IEES, Philippe Biron

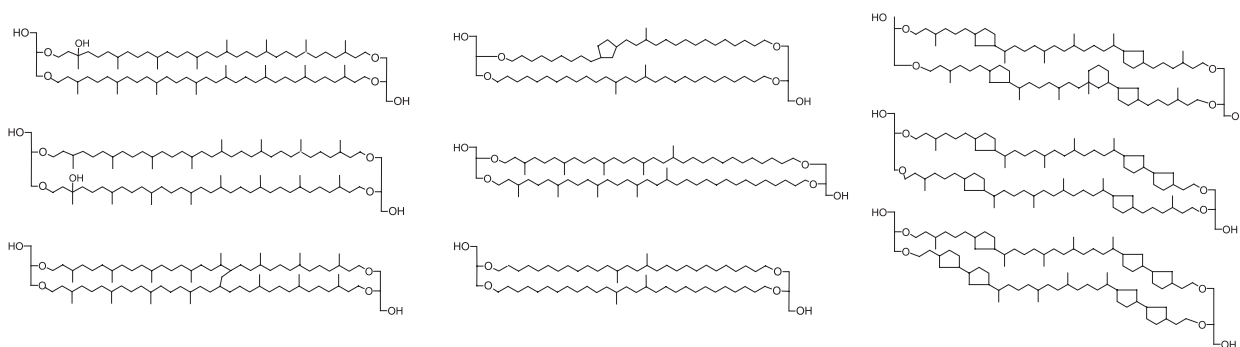


Figure 2. Exemples d'éthers de glycérol, marqueurs microbiens utilisés comme proxies des conditions environnementales (T° de l'air, T° des eaux, pH des sols). © Schouten et al., *Organic Geochemistry*, 2013

écosystèmes, de la picobactérie au paysage, en passant par toute la gamme des activités agro-pastorales. Cependant, si les outils de l'écologie moléculaire sont prometteurs, les limites et les conditions de leur utilisation sont mal définies et des calibrations restent nécessaires.

Une autre piste pour mieux tracer la complexité des écosystèmes et la structuration de la biodiversité passée est de se référer aux interactions entre organismes et entre communautés d'organismes mises en évidence par les approches écologiques.

Marqueurs des activités humaines

La question des impacts passés des activités humaines sur la structuration des communautés biologiques, sur la géochimie des eaux et des sols ou sur les déséquilibres induits à l'échelle de l'écosystème ou du bassin versant pourrait être abordée de manière plus approfondie qu'elle ne l'est actuellement. Ces impacts sont parfois loin d'être négligeables (les régions minières, par exemple). Or, leur évaluation quantitative fait encore largement défaut dans les reconstitutions paléo-environnementales. À l'échelle globale, l'action de l'homme sur les cycles biogéochimiques a une histoire qu'il est aussi nécessaire de mieux définir. Dans cette perspective, la recherche de marqueurs géochimiques, chimiques et biologiques univoques de l'activité humaine pourrait être encouragée. Cette recherche passe par la définition de référentiels basés sur des fonds biogéochimiques « naturels » combinée à l'étude de zones fortement anthropisées et elle implique des collaborations entre sédimentologues, pédologues, géochimistes, biologistes et écotoxicologues.

Marqueurs des processus hydrologiques, d'altération et d'érosion

Dans un contexte d'évolution climatique et de pression démographique rapide, il est déterminant de mieux contraindre le cycle de l'eau et sa dynamique au cours du temps. La dynamique de recharge des grands aquifères est par exemple mal connue. Pour la préciser, il est nécessaire de reconstituer les conditions hydriques et thermiques des paléo-recharges et de dater l'eau à

l'échelle des cycles climatiques du Quaternaire. Dans cet objectif, les marqueurs du cycle de l'eau (isotopes stables de l'eau $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) ou des températures (concentrations en gaz nobles) doivent être calibrés sur l'actuel ou des périodes passées mieux contraintes. Simultanément le développement d'outils de datation (isotopes cosmogéniques et radionucléides : ^{14}C , ^{36}Cl , ^{81}Kr , ^4He) doit être encouragé. Le régime hydrique des sols, quant à lui, varie à l'échelle saisonnière. Cette variation peut être enregistrée par différents marqueurs (e.g., cernes, $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ de bois, tissus, molécules ou structures minérales biogéniques). Là encore, des calibrations sur l'actuel ou des périodes passées bien contraintes doivent être menées.

En lien avec la caractérisation de la dynamique du cycle de l'eau, les approches récemment développées pour estimer la variabilité climatique passée (paléo-températures et paléo-précipitations) et caractériser les transports de masses atmosphériques (intensité et localisation des sources, paléo-vents, paléo-courants et paléo-tempêtes) doivent être soutenues.

Les flux d'érosion à l'échelle d'une parcelle ou d'un bassin versant sont communément quantifiés à partir de marqueurs sédimentaires (e.g., granulométriques, minéralogiques, élémentaires ou magnétiques). En revanche, l'intensité et la qualité de l'altération dans la zone critique, qui ont varié au cours du temps (de plusieurs dizaines de millions d'années à l'actuel), restent peu renseignées. Afin de reconstituer ces variations, et d'examiner les causes et mécanismes sous-jacents, les enregistrements granulométriques, élémentaires, minéralogiques, isotopiques (e.g., $^7\text{Li}/^6\text{Li}$, $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$, $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$, $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) ou moléculaires restitués par les sédiments à l'aval des sites étudiés peuvent être largement valorisés. Ils sont le reflet de l'intégration de processus de mobilisation, transfert, remobilisation et dépôt, gouvernés par les conditions physicochimiques du milieu, les capacités d'échanges ioniques, les interactions organo-minérales et les capacités de cisaillement. La vision intégrée offerte par les sédiments à l'aval permet de hiérarchiser les processus et de pointer ceux dont il faudra privilégier l'étude.

• Encourager l'acquisition simultanée d'archives physiques, géochimiques, biologiques et documentaires et la production de données quantitatives utilisables par les modèles

Prendre en compte, dans les reconstitutions paléo-environnementales, la complexité des processus ayant conduit aux surfaces et interfaces continentales actuelles passe par l'acquisition simultanée d'archives physiques, géochimiques, biologiques et documentaires, par le développement de nouvelles archives environnementales (e.g., otholites, granulats de vers de terre, dents de micromammifères, etc.), par la production de données quantitatives et par le développement de bases de données exploitables dans les modèles.

Multi-proxies : de la programmation scientifique intégrée à la réutilisation post-programme des archives naturelles

L'acquisition du matériel géologique porteur de l'information paléo-environnementale intéressant la communauté SIC (carottes de sédiments, de tourbe, de lœss, de sols et de paléosols, spéléothèmes, cernes d'arbres, dépôts archéologiques, etc.) est caractérisée par un éclatement des moyens et une diversité des outils. Relativement plus facile que celle des archives glaciologiques et marines, l'acquisition des archives continentales est réalisée aujourd'hui sans programmation intégrée interdisciplinaire. Les études multi-proxies portées par une équipe nationale sont rares et pour la plupart dépendantes de financements sur projets. En limitant ainsi les types d'analyse pour une archive donnée ou en ne permettant pas la réutilisation de l'archive à l'issue des programmes de recherche initialement dédiés, la communauté se prive d'une grande richesse. Il est donc important de renforcer la structuration de la communauté en projetant des acquisitions et conservations d'archives, ce qui permettra de réaliser sur le long terme des analyses multi-proxies. Cela implique d'établir simultanément un plan de gestion des échantillons collectés, incluant une gestion des métadonnées et des données, afin de permettre, en aval de la programmation scientifique, une meilleure valorisation des échantillons prélevés et des analyses effectuées.

En ce qui concerne les carottages sédimentaires, la cellule « continent » du Centre de carottage et de forage national (C2FN) a pour vocation d'améliorer la capacité d'action de la communauté nationale en concentrant son effort en matière de moyens d'acquisition. Cette ambition est soutenue par le programme français Investissements d'avenir via le projet EquipEx CLIMCOR qui vise à développer de nouveaux moyens d'acquisition de terrain à terre, sur lac et en domaine littoral.

Au sein de CLIMCOR, un travail prospectif est également mené pour proposer à la communauté des outils numériques de gestion des métadonnées et des données. Il s'agit d'une étape préalable à un futur plan de gestion des échantillons géologiques paléo-environnementaux pas uniquement continentaux, qui devra intégrer la création de carothèques nationales fonctionnant en réseau. Les modalités de soutien d'un tel plan restent à définir, mais une proposition pourrait être faite dans le cadre de la prochaine campagne d'Investissements d'avenir. Doté d'un conseil scientifique représentatif de l'ensemble de la communauté (CNRS-INSU, CNRS-InEE, CEA, IRD, CNRS-InSHS), le C2FN et son bras financier, CLIMCOR, sont ainsi susceptibles de favoriser l'émergence de nouvelles pratiques, plus intégrées et moins dépensières en termes de ressources humaines et financières. Cette volonté de développement doit s'inscrire dans la démarche lancée à l'échelle internationale pour favoriser l'accès libre aux données issues de l'action publique en général et de la recherche en particulier (Open data).

Précisions spatiales et temporelles des indicateurs, taphonomie

Afin de produire des données quantitatives utilisables par les modélisateurs, les précisions spatiales et temporelles des indicateurs doivent être interrogées. Pour une archive donnée (e.g., sédiment, tourbe, paléosol, sol), il est important de repérer les zones sources dominantes (« hot spots ») ou, en d'autres termes, les contributions respectives des sous-bassins versants emboîtés, et ce en opérant des transferts d'échelle. La multiplication des archives (e.g., multi-carottage de sédiments lacustres ou confrontations d'archives différentes ; Fig. 3) permet de contraindre les éventuels hiatus, de discuter la multiplicité des sources et de distinguer les sources régionales (e.g., bassin versant) des sources locales (e.g., bordure de lac et production *in situ*). L'information chronologique portée par les différents marqueurs peut être investiguée si les vecteurs et phases porteuses (e.g., complexes organo-minéraux) sont identifiés depuis la source jusqu'au puits et si les techniques adéquates de séparation et de datation (sur micro-échantillons ou sur molécules, par exemple) sont développées. Cet effort est particulièrement nécessaire pour les archives à chronologie imbriquée (telles que les sols) dont les héritages multiples demeurent difficiles à discriminer. L'évaluation et la comparaison de la précision temporelle des marqueurs dépendent aussi de l'accessibilité aux archives à haute résolution temporelle ainsi qu'aux données associées. À l'instar des « hot spots », il est également nécessaire de repérer les périodes les plus dynamiques (« hot moments »), c'est-à-dire les plus sensibles dans l'archive, ce qui améliorera en particulier notre connaissance de l'évolution des événements singuliers ou extrêmes.

Outre les biais temporels, spatiaux et quantitatifs, les transformations des marqueurs de la source au puits et les

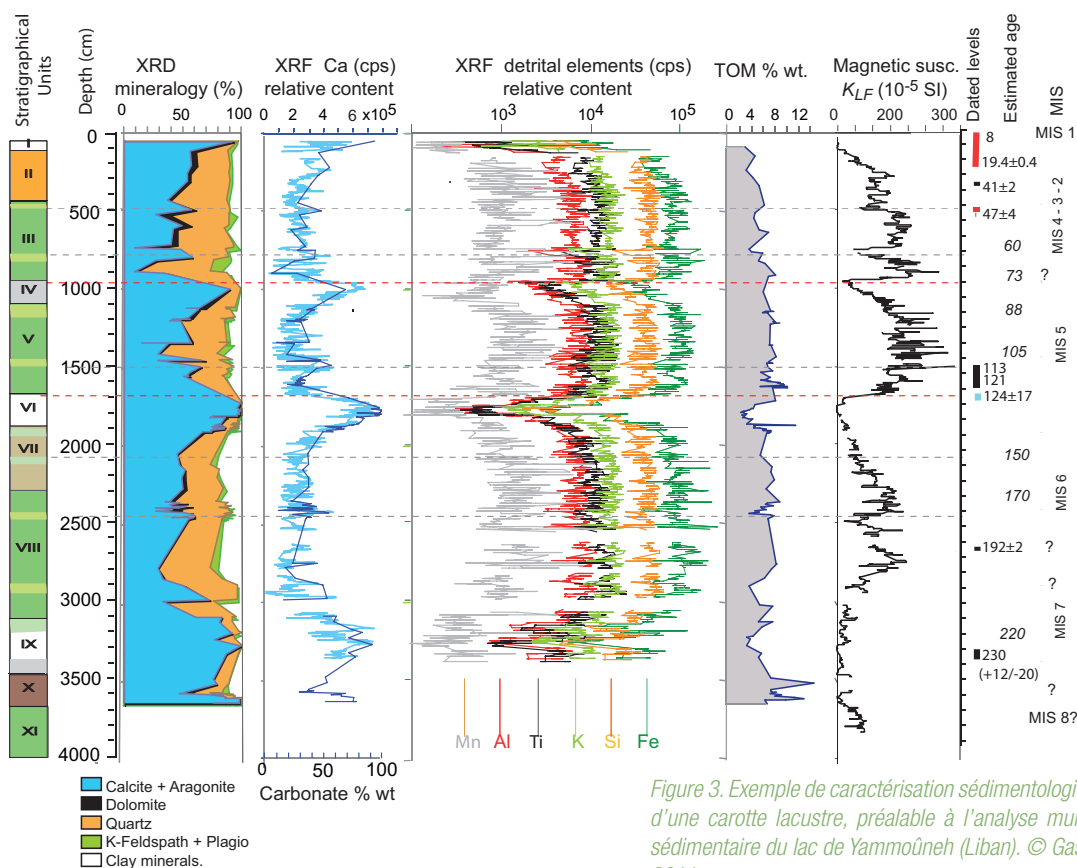


Figure 3. Exemple de caractérisation sédimentologique et chronologique d'une carotte lacustre, préalable à l'analyse multi-proxy. Ici : Archive sédimentaire du lac de Yammoûneh (Liban). © Gasse et al., *Clim. Past*, 2011

processus diagénetiques post-dépôts dépendent des conditions physicochimiques des milieux et doivent être contraints par des calibrations, traçages et expérimentations sur l'actuel. L'ensemble de ces préoccupations est largement partagé par les spécialistes des cycles biogéochimiques des éléments, de l'érosion ou de l'écodynamique des polluants.

Mise en relation de données archéologiques, historiques, sociologiques, démographiques et économiques avec les données environnementales et climatiques

Atténuer l'impact du changement climatique actuel est généralement considéré comme l'un des plus gros défis des prochaines années, à toutes les échelles géographiques et dans tous les secteurs socio-économiques. Dans ce contexte, l'étude du passé a un rôle non négligeable à jouer. Tout d'abord, il convient de replacer le réchauffement actuel dans une perspective historique et spatiale à long terme. Pour cela, des enregistrements à haute résolution de la pression des changements climatiques historiques sur les sociétés du passé sont requis. Ces enregistrements, nécessairement multi-proxies, doivent inclure les apports de la paléoclimatologie, de la paléoécologie, de l'archéologie et de l'histoire. Les informations nécessaires concernent le climat, les environnements, les ressources (nourriture, bois, eau), la démographie, l'organisation politique (modes de prise de décision),

les modes d'agriculture, de pastoralisme et d'occupation des terres, le commerce et le niveau de richesse des communautés et sociétés. Il est important de connaître la vulnérabilité et la résilience d'une communauté face à un stress climatique prolongé. Est-elle capable de s'adapter en modifiant son fonctionnement, son agriculture ou en migrant? Ou bien est-elle condamnée au déclin et à la disparition? Tous les cas de figures ont existé dans le passé. L'étude des communautés passées et surtout l'utilisation d'expériences grandeur nature dans un système de modélisation peuvent nous fournir des pistes de réflexion pour anticiper le futur proche et même lointain. Les sociétés modernes ayant un niveau technologique supérieur à tout ce qui a existé dans le passé et vivant dans ce qu'on appelle le village global, on ne peut transposer directement les résultats du passé. Néanmoins, l'étude du passé, avec des outils de modélisation adaptés et des données fines et à caractère multidisciplinaire, peut apporter des éléments sur la capacité naturelle d'adaptation de certains types d'organisation politique et culturelle.

Élaboration de bases de données interopérables

De nombreuses données biologiques, écologiques, physiques et de sciences humaines, renseignent sur le passé avec une haute résolution spatiale et temporelle. Elles existent mais restent souvent stockées de façon éparse dans les laboratoires français. Ces données sont issues de sources multiples et hétérogènes

(carottages, observatoires, relevés, etc.). Des données acquises en sciences humaines et sociales (dont certaines sont disparates, qualitatives, textuelles) cohabitent avec des données massives issues de réseaux d'observation et de télédétection. Il existe un hiatus entre données actuelles et données du passé, tant au niveau de la couverture spatiale, de l'échelle spatiale, de leur représentativité que de leur degré d'intégration. Comment faire pour intégrer les données du passé (rares) et les données actuelles (massives) dans une meilleure interprétation de l'évolution des systèmes étudiés? Comment relier les données du passé à l'écosystème et au paysage? Comment intégrer ces données dans les modèles? Pour répondre à ces questions, les efforts doivent être portés dans deux directions :

- des bases de données internationales accessibles en ligne pour l'ensemble de la communauté scientifique doivent être créées; la tâche est conséquente puisqu'il s'agit à la fois de mener de grandes campagnes de sauvetage de données (environmental data rescue) et de grandes campagnes de collecte de données et d'assurer la cohérence des bases de données et des systèmes d'information aux niveaux national et international;
- les bases de données existantes doivent être interopérables; il ne s'agit pas de mettre en un même lieu l'ensemble des données, mais plutôt de mettre en place des catalogues selon une norme acceptée (e.g., norme ISO 19115:2003 pour les métadonnées de nature géographique).

Pour les données qui concernent les SIC et qui sont très souvent géo-référencées, la directive européenne INSPIRE vise à établir une infrastructure d'information géographique au sein de la communauté européenne. L'objectif est de favoriser la mise à disposition et le partage de données géo-référencées à travers le respect de règles d'interopérabilité, grâce aux métadonnées qui donnent la définition de la donnée, l'adresse de son stockage et son mode d'accès.

Pour ce faire, un effort technique et humain important doit donc être fourni, ainsi qu'une implication active des chercheurs disposant des données.

• Élaborer des cadres chronologiques fiables des derniers cycles climatiques à l'actuel

La géochronologie combine les domaines de la «radiochronologie» (^{210}Pb , ^{14}C , $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, U/Th, OSL, etc.) et de la «chrono-stratigraphie» (e.g., stratigraphie magnétique, isotopique, biologique) (Fig. 3). Elle est mise en œuvre pour replacer les événements marquants de l'histoire de la Terre et des sociétés humaines dans un cadre spatio-temporel absolu et précis. Ce

cadre doit être amélioré en permanence en unifiant les échelles de temps, c'est-à-dire en synchronisant les archives, qu'elles soient géologiques, géochimiques, climatiques, écologiques ou représentatives des activités humaines. Au-delà de l'utilisation de traçages radio-chronologiques naturels, l'utilisation de marquages ponctuels accidentels ou non (e.g., rejets de centrale nucléaire ou d'hôpitaux, Tchernobyl), de marquages plus longs dans le temps (e.g., essais atmosphériques des bombes thermonucléaires) ou de marquages opportunistes (e.g., événements de pluie) ouvre la porte à des chronologies courtes (de la journée à quelques décennies), qui complètent le spectre des possibles (^{137}Cs , ^3H , ^7Be , ^{14}C).

Les défis scientifiques actuels auxquels fait face la recherche française, forte de son expertise, se déclinent en plusieurs volets que l'on pourrait regrouper comme suit :

- contraindre la chronologie précise des séquences d'événements (climatiques, anthropiques, etc.) pour mieux identifier les forçages et rétroactions, en travaillant en particulier sur des durées, phasages et/ou déphasages d'événements climatiques reconnus;
- comprendre les impacts respectifs des changements climatiques et de l'occupation humaine sur les environnements;
- comprendre les relations entre changements environnementaux et sociétés humaines.

À ces défis scientifiques, qui nécessitent de repousser les limites instrumentales ou conceptuelles des méthodes, correspondent des défis méthodologiques. Sur la base de son expertise et pour répondre à des thématiques scientifiques de plus en plus pointues, la communauté se doit de développer son parc technologique et analytique. L'un des défis actuels est de repousser les limites des méthodes de datation (par exemple en étendant la méthode U/Th ou celle de luminescence au-delà de 400 000 ans ou au contraire à des périodes très récentes). Il s'agit aussi de tester et de valider de nouveaux supports de datation grâce à la miniaturisation des échantillons (e.g., ^{14}C sur molécules spécifiques et structures biologiques identifiées, U/Th sur foraminifères) et de définir de nouveaux protocoles et de nouvelles approches en radio-chronologie et en chrono-stratigraphie. Il s'agit enfin de combiner et confronter différentes approches de datation sur de mêmes archives. Chaque méthode caractérisant des processus ou des moments différents, leur confrontation permettra en effet de mettre en lumière d'éventuels déphasages ou synchronismes. Une réflexion de fond doit aussi être menée sur la signification et l'incidence des changements d'échelle : que représente la datation sur un seul individu? Quelles informations peut-on extraire de la comparaison entre datation «bulk» (échantillon total) et datation sur molécules spécifiques? Comment déconvoluer les signaux?

Ces développements analytiques et méthodologiques impactent toutes les échelles de temps depuis les chronologies très courtes (quelques jours, quelques semaines) sur la base de rejets accidentels (^{131}I) ou de contraintes météorologiques spécifiques (^7Be) ainsi que dans les chronologies de quelques décennies (^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{137}Cs , ^{14}C thermonucléaire) et les chronologies plurimillénaires (^{14}C , $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, U/Th, TL et OSL).

Ce sont l'augmentation de la capacité analytique et le partage des expertises qui permettront à la communauté française de répondre aux questions fondamentales sur la dynamique des processus, les phasages/déphasages des événements et les temps de réponse et de résilience des écosystèmes. En particulier, la France possède une expertise forte quant à la datation à l'échelle du siècle, par l'analyse des radioéléments à courte vie (^{210}Pb , ^{137}Cs , ^{241}Am , ^7Be), mais l'accès à ces mesures et à l'expertise requise pour interpréter les données reste limité. L'extension prévue du Laboratoire souterrain de Modane (LSM), au sein duquel les bruits de fond sont parmi les plus bas du monde, est une opportunité pour la communauté. Ce laboratoire accueille déjà des compteurs gamma installés par des équipes extérieures auxquelles le laboratoire propose une équipe de techniciens pour assurer la maintenance des appareils et le passage des échantillons. Son extension, comprenant une salle dédiée aux mesures bas bruit de la radioactivité environnementale, offre l'opportunité de concentrer les forces matérielles, tout en conservant les compétences scientifiques au sein des unités, à l'instar du mode de fonctionnement des physiciens des particules qui gèrent le LSM. Les autres méthodes de géochronologie (^{14}C , luminescence et autres) pâtissent d'un manque notable d'infrastructures. Dans tous ces domaines, la capacité analytique et le service accompagné (ce qui inclut les conseils en amont du prélèvement de l'échantillon et l'aide à l'interprétation en aval de la mesure) doivent augmenter. L'accroissement, la modernisation et la dispersion thématique des parcs analytiques se traduiront par une amélioration de l'offre de service accompagné, en termes de volume d'analyses, de diversité des matériaux analysés et de qualité des analyses (la concurrence oblige à des efforts et favorise les exercices d'inter-comparaison).

• Développer l'interopérabilité des modèles

Les modèles numériques sont devenus les outils privilégiés pour établir des projections de l'état du climat, des surfaces, des écosystèmes et de la biodiversité sur les siècles à venir. De nombreux modèles ont été développés ces deux dernières décennies pour répondre à des questions particulières sur le devenir des systèmes naturels (par exemple, quels sont les paramètres qui influencent l'eutrophisation des cours d'eau?). Néanmoins, très peu d'entre eux sont actuellement capables d'apporter des réponses à des

questions intégratives (des populations aux écosystèmes, incluant les systèmes anthropo-construits), telles qu'elles sont posées par les aménageurs et les politiques.

Ces modèles traitent souvent un seul système à une échelle donnée. Il est maintenant nécessaire de les interfacer pour intégrer les systèmes et les échelles. Cela pose des questions méthodologiques : dispose-t-on des masses de données, actuelles et passées, nécessaires à la calibration-validation des modèles? Comment interfacer les modèles? Les modèles sont-ils capables de traiter les échelles multiples ou doivent-ils être spécifiques à une échelle puis couplés?

Le niveau de complexité des modèles est également un point de débat. L'objectif de réalisme implique-t-il une complexification croissante des modèles? Un modèle trop complexe, dans lequel les processus sont décrits de manière trop détaillée, risquant de perdre une grande part de son utilité, jusqu'où doit-on aller? *A minima*, la diversité, la distribution et les organisations spatiales du milieu physique devraient être prises en compte comme co-variables dans les interactions entre dynamique climatique et dynamique des surfaces et des agroécosystèmes.

Un modèle intégré, qui va du climat à la société en passant par les écosystèmes « naturels » et anthropogéniques et par la production de nourriture (agrosystèmes, pêcheries, pastoralisme), se doit d'être testé à différentes échelles de temps et d'espace. Les sociétés du passé présentent toute la diversité nécessaire à de tels tests. À chaque étape d'une telle modélisation, se posent des problèmes de changement d'échelle et de détermination des variables pertinentes pour l'étape suivante. En particulier la modélisation socio-économique (par exemple basée sur des méthodes multi-agents) a besoin d'indicateurs des ressources disponibles pour une communauté et de ses modes de consommation et de prise de décision. Si elle est correctement mise en place, cette modélisation produira des indicateurs de la capacité d'adaptation de la communauté face à un stress climatique qui perdure et de la durabilité de son mode de développement. Ainsi, le développement d'indicateurs est un moyen utile de faire communiquer des disciplines différentes.

D'un point de vue plus technique, certaines méthodes récentes de fusion modèles-données, souvent produites dans des disciplines où les données sont nombreuses et statistiquement homogènes, se révèlent très innovantes lorsqu'elles sont utilisées pour des données paléo-environnementales peu nombreuses et souvent hétérogènes. Elles sont utilisées de plus en plus, soit en inversion de modèles de proxies pour obtenir des reconstructions climatiques plus robustes aux conditions exogènes, soit en assimilation de données dans les modèles climatiques pour obtenir des simulations plus réalistes. Ce sont des directions très prometteuses qu'il convient d'encourager. Appliquées sur

les dernières décennies, les méthodes d'assimilation produisent des ré-analyses de champs climatiques extrêmement robustes car basées sur de nombreuses données météorologiques et de télédétection. L'utilisation d'archives historiques et de séries de proxies à résolution annuelle (e.g., cernes d'arbres, varves sédimentaires) doit permettre d'étendre ces ré-analyses sur quelques siècles.

- **Encourager l'étude de zones pour lesquelles les comparaisons modèles/données manquent**

La validation des modèles et la compréhension des processus régissant les surfaces et interfaces continentales sont souvent limitées par la faiblesse du nombre de données disponibles.

Ainsi, les acquisitions d'enregistrements paléo-environnementaux multi-proxies devraient être encouragées pour certaines zones géographiques (zone intertropicale, Moyen-Orient, hautes latitudes, zones polaires) ou certaines interfaces (zones estuariennes, zones tampon entre bassin versant et zone côtière, interfaces entre rivières et zones humides, milieux karstiques, plateaux couverts de manteaux d'altération très épais).

Les espaces urbains constituent des milieux dans lesquels l'anthropisation a atteint son paroxysme. Il n'en demeure pas moins qu'ils combinent l'ensemble des questions abordées dans l'étude des surfaces et interfaces continentales (par exemple, processus physicochimiques comparables à ceux qui prévalent dans les milieux plus naturels, modalités de transfert et de réactivité des matières ou hétérogénéité spatio-temporelle des interactions). Les disciplines et thématiques impliquées dans l'étude des contextes urbains sont les mêmes que celles des SIC « classiques » (hydrologie, botanique, pédologie, climatologie, géochimie, étude des pollutions, etc.), avec toutefois une composante socio-économique plus prégnante. La ville constitue

un formidable laboratoire d'étude des processus de transformation de la source au puits, avec une emprise des activités humaines exacerbée. Cela constitue une aubaine pour comparer, dans la durée, des paramètres physicochimiques avec des paramètres sociaux et économiques, même si la recherche d'archives à haute résolution temporelle constitue, en soi, un défi. Outre la connexion évidente des spécialistes des paléo-environnements urbains avec les communautés SHS (urbanistes, historiens, sociologues) ou de la santé, des connexions au sein des SIC entre hydrologues, climatologues, spécialistes des polluants (organiques et minéraux), biologistes et microbiologistes pourraient être renforcées.

- **Des pistes pour structurer ces développements**

- **Créer des rétro-observatoires au sein des observatoires SIC**

La déclinaison française du mouvement international visant à créer des observatoires de long terme de l'environnement (LTER: Long term ecological research network) passe notamment par les dispositifs labélisés SOERE. Cependant, ces dispositifs, jeunes dans leur mise en place, permettent rarement de couvrir des échelles de temps supérieures à quelques décennies. De plus, ils ont un champ d'enregistrement par nature limité dans l'espace. Les progrès récents en termes de capacités analytiques permettent aux approches paléo-environnementales d'être pertinentes sur des échelles de temps allant du siècle à plusieurs millions d'années, compatibles et complémentaires des investigations menées par les chercheurs travaillant sur les dynamiques actuelles des environnements. Associées au développement de marqueurs communs, les archives paléo-environnementales devraient permettre d'offrir une profondeur de temps à notre connaissance des paramètres et processus agissant sur les surfaces et interfaces continentales (Fig. 4).

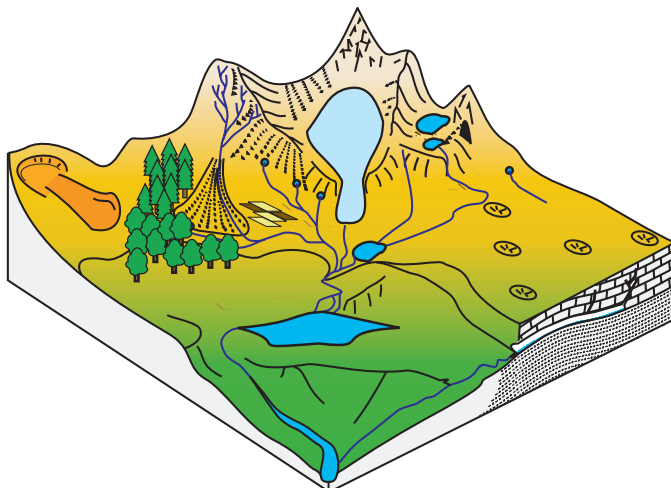


Figure 4. Modèle de bassin versant illustrant la diversité des facteurs enregistrés dans les archives sédimentaires et caractérisant les surfaces et interfaces continentales. © EDYTEM, Fabien Arnaud

Dans cette optique, il est proposé d'articuler de manière plus étroite observation et rétro-observation. Cela pourrait s'opérer de manière particulièrement intéressante au sein des SOERE et de certains Services nationaux d'observation du CNRS-INSU.

Par exemple, une des difficultés de l'étude de la zone critique est l'emboîtement des échelles de temps caractéristiques (de la seconde à la dizaine de millions d'années) et d'espace (du micron au millier de kilomètres carrés). Le Réseau des bassins versants (SOERE RBV) pourrait encourager l'intégration d'archives (sédiments de lacs, de marécages, de réservoirs artificiels et de deltas, tourbes, sols, paléosols, épaisseur de profils d'altération, spéléothèmes, cernes d'arbres, etc.) au sein ou à proximité des sites labellisés, afin d'avoir un recul sur l'évolution passée de certains processus étudiés (échelle de temps variable selon les sites). Simultanément, l'étude par l'instrumentation du bassin versant de la construction actuelle de l'archive permettrait d'identifier les modalités d'archivage des « hot spots » et « hot moments ».

- **Intégrer la perspective paléo-environnementale aux actions thématiques de EC2CO**

Les communautés des écologues, écotoxicologues, microbiologistes, hydrologues, pédologues, géochimistes et chimistes

de l'environnement peuvent nourrir leurs questionnements de la connaissance de la profondeur temporelle apportée par les reconstitutions paléo-environnementales. En retour, la justesse et la précision des données paléo-environnementales, et des modèles les utilisant, peuvent être mieux contraintes à la lumière des processus biogéochimiques mis en évidence dans l'évolution actuelle des surfaces et interfaces continentales.

Afin d'encourager la mise en commun de problématiques, d'expertises et d'outils, plusieurs pistes sont proposées. Elles portent sur la calibration des marqueurs paléo-environnementaux, l'acquisition simultanée d'archives biologiques, géochimiques, physiques et documentaires, la production de données quantitatives utilisables par les modèles (en encourageant l'étude de zones pour lesquelles les comparaisons modèles/données manquent), le développement de l'interopérabilité des modèles et l'amélioration des cadres chronologiques au sein desquels les processus de modification des surfaces et interfaces continentales ont lieu. Cela peut se faire simplement en intégrant une perspective paléo-environnementale aux approches encouragées par les quatre actions thématiques du programme EC2CO (initiative structurante Écosphère continentale et côtière), de préférence en coordination avec le programme LEFE (Les enveloppes fluides et l'environnement), et au-delà, en se rapprochant des études portant sur l'évolution des systèmes écologiques et des interactions entre l'homme et son milieu développées par le CNRS-InEE et le CNRS-InSHS.



Les outils de la recherche en SIC

Services d'observation

Dans ce chapitre, on utilisera le terme « systèmes d'observation » pour désigner toute activité d'observation systématique (SO CNRS-INSU, ORE, SOERE, etc.), quel que soit l'organisme en charge de sa mise en œuvre. On réservera le terme « Services d'observation » (SO) aux systèmes d'observation dont le CNRS-INSU, seul ou en partenariat, a la charge de la mise en œuvre.

Une Commission observatoires a été mise en place par la CS SIC mi-2012 avec pour mission générale d'établir un panorama des systèmes d'observation SIC, de clarifier le dispositif de ces différents outils d'observation au sein du CNRS-INSU et d'AllEnvi, et de conduire une procédure d'évaluation et de labellisation des Services d'observation (SO). Cette commission s'est définie un plan de travail en deux étapes. La première étape a consisté à traiter, avant les journées de prospective de mai 2013, les questions liées au recensement des Services d'observation (étendu à quelques autres systèmes d'observation) et à l'organisation du paysage national en matière d'observations d'intérêt pour les SIC. Les conclusions de la commission sur ces points ont été présentées et débattues lors des journées de prospective. La deuxième étape concerne les aspects liés à l'évaluation et à la labellisation des SO. Ceux-ci seront traités après le rendu écrit de prospective, c'est-à-dire après que les orientations scientifiques prioritaires dans le domaine SIC pour les prochaines années et les principes de fonctionnement des SO aient été discutés et collectivement adoptés.

■ Méthode

La méthode de travail retenue reposait :

- d'une part, sur l'analyse de documents (plus ou moins récents) liés à la mise en place ou à l'évaluation des SO, ORE, SOERE et sur la prise en considération du document stratégique sur les SNO (Services nationaux d'observation) produit par la direction du CNRS-INSU ;
- d'autre part, sur des éléments « d'enquête ».

Ainsi, des fiches de renseignements couvrant l'essentiel des points clés et missions attachés aux SO ont été envoyées aux responsables des OSU pour être complétées. Elles ont ensuite été analysées par la commission. Dans un second temps, cette « enquête » a été étendue à des systèmes d'observation rentrant dans le périmètre des questionnements scientifiques attachés aux surfaces et interfaces continentales mais gérés par d'autres organismes que le CNRS-INSU. L'idée était d'obtenir une vue aussi exhaustive que possible des domaines couverts, quels que soient les organismes en charge, de façon à identifier

d'éventuels manques, de possibles redondances (la limite à une non duplication des observations étant que les données recueillies soient accessibles à la communauté scientifique), voire des convergences d'intérêt non exploitées.

Les réflexions présentées ci-dessous résultent pour l'essentiel de l'analyse de ces diverses sources d'information et des connaissances propres à chaque membre de la commission sur tel ou tel aspect du problème.

■ Recensement

Au 1/02/2013, quinze entités sont labellisés SO SIC par le CNRS-INSU. Les retours des directeurs d'OSU ont également permis de recenser d'autres systèmes d'observation, à savoir des infrastructures dépendant essentiellement de l'INRA, de l'IRD ou de l'IRSTEA, voire des observatoires dépendant des OSU mais non labellisés. Par ailleurs, suite au second volet de cette enquête, certains systèmes d'observation INRA ou IRD ont pu être intégrés à la réflexion menée sur l'observation en SIC.

• Quelle identité pour les SO SIC ?

L'analyse des fiches concernant les SO SIC montre que ceux-ci se définissent majoritairement comme des sites instrumentés avec des phases d'acquisition multi-paramètres auxquelles s'ajoutent des actions expérimentales menées au gré des besoins (Fig. 1). Ceci les distingue par exemple des SO OA qui sont le plus souvent des infrastructures mono-variables, souvent en réseau et documentant sur le long terme des informations à grande échelle exploitées par une communauté large. Un recensement rapide (et donc forcément non exhaustif) montre que plus de 150 projets de recherche (européens, ANR, programmes nationaux, actions régionales, etc.) ont utilisé les données produites par ces SO. Enfin, les SO SIC (sites instrumentés) se distinguent des zones ateliers du CNRS-InEE par la taille caractéristique de l'atelier (site local pour les SO SIC, zone géographique à l'échelle du paysage, voire de la région, pour les ZA), ainsi que par le fait que les ZA, qui inscrivent explicitement dans leur mission de documentation des questions à caractère socio-économique, ont une implication forte dans la société civile alors que la question première des SO SIC reste celle du fonctionnement des systèmes bio-physicochimiques



Figure 1. Creusement de puits sur un site du SNO H+ (réseau national de sites hydrogéologiques) pour l'élaboration de tests hydrauliques en interférences. © IC2MP, Gilles Porel

aux interfaces lithosphère – atmosphère – hydrosphère. Les SO ne sont pas pour autant exclus des préoccupations de la société civile et beaucoup de leur financement repose d'ailleurs sur des partenariats ou du « sponsoring » local.

On note que les sites instrumentés ont fréquemment une dimension et une portée nationale: l'activité scientifique est partagée et elle fait l'objet de contractualisations réalisées dans le cadre de consortiums plus larges que le regroupement des détenteurs du « foncier » des services.

L'analyse fait également ressortir l'absence de SO ayant une tâche de service liée au maintien/développement/diffusion de codes numériques communautaires. En cherchant à travailler sur les mécanismes, la communauté développe de la modélisation numérique de type prédictif ou explicatif des faits d'observation. Cette approche ne semble pas justifier pour l'instant l'élaboration de codes dits communautaires (quand bien même la communauté SIC pourrait - et elle le fait - apporter sa pierre à l'édifice des codes communautaires).

Ces constats ont permis de converger vers une première définition des SO SIC actuels ce sont principalement des sites instrumentés (qu'ils soient constitués d'une station individuelle ou d'un réseau de stations) qui assurent de façon systématique l'acquisition de données sur des variables d'intérêt pour la compréhension du fonctionnement des surfaces et interfaces continentales et sur des périodes de temps excédant celles généralement couvertes par des campagnes expérimentales de durée limitée. C'est sur ce premier niveau de périmètre des SO que la commission a conduit la suite de son travail.

• Quelles thématiques pour les systèmes d'observation SIC ?

L'analyse des fiches reçues (il s'agit donc d'une analyse non exhaustive) permet de dresser une typologie générale des thématiques scientifiques documentées par les systèmes d'observation SIC :

- la dynamique des flux hydriques, biogéochimiques ou érosifs (thématique majoritaire), incluant bassins versants, hydrométéorologie à toutes les échelles, hydrosystèmes souterrains et karstiques, glaciers... ;
- les sols des agrosystèmes (thématique qui, par certains aspects, se rapproche de la thématique dynamique des flux) ;
- la dynamique et le suivi des agrosystèmes (cultures, savanes, prairies) ;
- la dynamique littorale, en particulier le trait de côte ;
- les milieux très fortement anthropisés (friches industrielles, villes), une thématique émergente ;
- les zones humides, peu représentées actuellement si ce n'est par les systèmes de tourbières.

On notera que, même si certains de ces systèmes d'observation couvrent quelques interfaces entre milieux (observatoires hydrométéorologiques, observatoires de la dynamique littorale, etc.), certaines zones clés sont clairement manquantes, comme les zones estuariennes à l'interface océan – continent, les interfaces du paysage continental (e.g., forêts versus zones cultivées). Il en est de même de certains échanges de matière à l'interface atmosphère – continent (e.g., les aérosols minéraux, les composés organiques volatils ou le matériel biologique). Il est probable que cette faible représentation des interfaces, pourtant déjà affichées comme des milieux d'études prioritaires dans les prospectives SIC de Strasbourg (2007) ou OA de Grenoble (2011), dans les systèmes d'observation résulte (en partie) du cloisonnement trop fort des domaines gérant les différents milieux au sein des organismes, notamment au sein du CNRS-INSU.

• Quelles sont les variables mesurées ?

La commission a également entamé un travail visant à identifier puis analyser les principales variables suivies par les systèmes d'observation SIC, à partir des fiches remplies par les responsables de systèmes d'observation (type de variable, protocole de mesure, taille caractéristique du support de mesure, fréquence, historicité). Pour cela plusieurs groupes de travail ont été constitués, principalement autour des thématiques scientifiques définies ci-

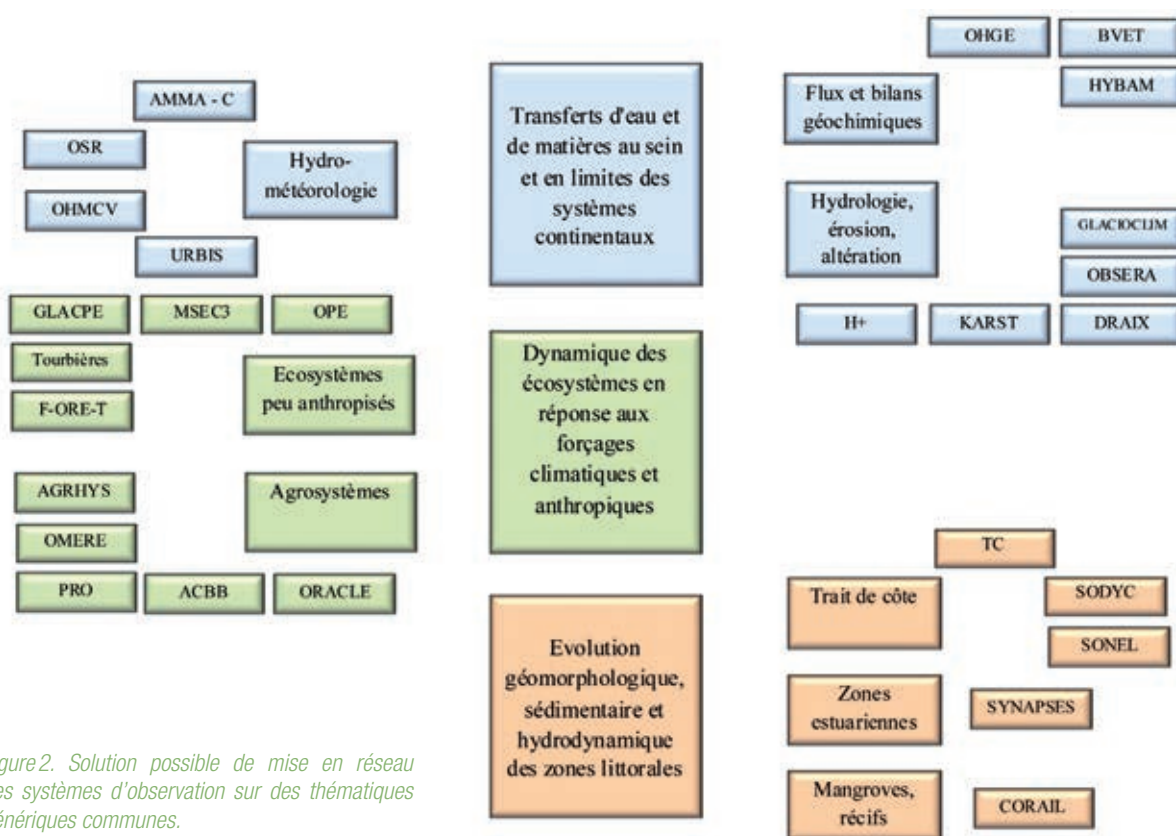


Figure 2. Solution possible de mise en réseau des systèmes d'observation sur des thématiques génériques communes.

dessus. Cet inventaire, nécessaire à une vision plus précise de l'activité d'observation, s'est cependant avéré plus lourd et plus complexe que prévu. Il est encore en cours et ne peut donc être présenté de façon pertinente et synthétique dans ce document.

■ Organisation et structuration des systèmes d'observation SIC

La commission s'est interrogée sur la généricité des variables mesurées, notamment au regard de ce qui permettrait de considérer un système d'observation comme représentatif non seulement du contexte physique local qu'il documente, mais également et plus généralement de mécanismes et processus fondamentaux. Au-delà de cette généricité des variables mesurées, la commission a également examiné la généricité des questions et verrons que certains systèmes d'observation sont supposés documenter.

Une telle démarche montre que certains sites instrumentés « orphelins » présentent un intérêt régional très bien identifié alors que d'autres gagneraient beaucoup à rejoindre des réseaux internationaux existants. Enfin, il est surtout apparu que pour certaines thématiques, la mise en réseau au niveau national de certaines observations, voire de certains systèmes d'observation, apporterait une réelle plus-value scientifique. En complément des études à caractère régional menées à partir des données d'un

seul système d'observation, une organisation plus fédérative autoriserait des approches plus intégratives en termes d'échelle spatiale. La figure 2 (liste des acronymes en fin de chapitre) illustre les complémentarités possibles, autour de thèmes scientifiques partagés, entre les systèmes d'observation existants.

L'analyse des systèmes d'observation existants montre la nécessité de définir une stratégie scientifique lisible et permettant de justifier en quoi l'ensemble de ces systèmes d'observation concourt à résoudre les priorités scientifiques fortes de la communauté SIC. Dit autrement, chaque système d'observation est bien justifié individuellement en matière d'intérêt scientifique, mais l'intérêt du dispositif global n'est pas perceptible. La question posée (et la figure 2 illustre une des solutions possibles) est donc la suivante comment mettre *a minima* en réseau les systèmes d'observation individuels pour lesquels cela s'avère pertinent ?

Par ailleurs, au niveau supérieur (celui des organismes), une réflexion doit être menée sur la façon d'assurer la pérennité des systèmes d'observation en sciences de la planète Terre, afin de pouvoir notamment proposer une labellisation des systèmes nationaux d'observation en tant qu'infrastructures de recherche (selon la définition d'AllEnvi) qui soit la plus large possible.

Enfin, comme mentionné précédemment, nombre de ces systèmes d'observation ont un fort ancrage régional. Celui-ci résulte, pour

beaucoup, de l'intérêt que présentent les mesures réalisées pour les collectivités territoriales, les gestionnaires locaux, les PME et bureaux d'études. On notera également qu'une fraction non négligeable du budget de certains systèmes d'observation provient de partenaires régionaux. Ce fort ancrage régional des SO doit être préservé. Il faut donc asseoir, en complément du niveau national, une structuration régionale des systèmes d'observation pour laquelle les OSU semblent naturellement être les acteurs clés.

■ Partenariat et coûts des Services d'observation

De nombreux Services d'observation du CNRS-INSU sont construits au travers d'un partenariat entre organismes, lequel est souvent informel et donc non stabilisé. Il est indispensable que les SO et leurs tutelles aient une démarche proactive pour tenter d'établir des conventions de partenariat. Une réflexion sur le sujet semble donc devoir être engagée en n'oubliant pas que le budget moyen de fonctionnement d'un SO (sans les personnels) est souvent cinq à dix fois supérieur à sa seule dotation de fonctionnement/équipement CNRS-INSU. Les autres partenaires institutionnels (i.e., ceux qui mettent en commun des moyens) sont très divers et sortent assez souvent du seul cadre des organismes « académiques ». Il faut donc s'attendre à ce que, pour certains SO, les attentes des partenaires institutionnels ne se limitent pas aux seuls résultats d'une production scientifique académique. Ainsi, certains partenaires, les Régions notamment, considèrent aussi leur soutien aux SO comme une façon d'afficher leur dynamisme, leurs préoccupations environnementales, leur esprit d'entreprise ou encore leur investissement dans la formation. Il n'y a aucune réticence de principe à ce type de partenariat (qui peut souvent être gagnant/gagnant), pourvu que l'on en maîtrise pleinement l'ampleur et que l'on sache moduler et faire cohabiter les intérêts cognitifs des uns et applicatifs des autres.

Pour qu'une convention sérieuse et lisible puisse être proposée entre organismes et entre organismes et SO, dans le cadre d'une mission nationale de longue durée, il est à noter qu'elle devra être établie sur le foncier et non sur les actions scientifiques, par nature plus volatiles, qui s'appuient sur les SO. Quand bien même un SO (surtout s'il s'agit d'un site instrumenté sans attendu obligatoire au regard de la société civile) se doit d'être un instrument d'appui à la recherche, il faut bien distinguer ce qui est du registre du Service d'observation de ce qui est du registre de la recherche agrégée par lui. Cette dernière est une condition *sine qua non* du maintien d'un SO, mais ne peut être comptabilisée dans le bilan consolidé d'un SO, s'il s'agit d'évaluer les capacités financières et les moyens humains qui permettent de le faire vivre et de le faire évoluer. Au vu des fiches analysées, il semble indispensable, voire urgent, de clarifier la situation pour donner au CNRS-INSU

et aux éventuels partenaires institutionnels la vraie mesure des coûts effectifs liés à la seule mission d'observation *sensu stricto*. La capacité ou non à suppléer à des incidents budgétaires et à définir une stratégie nationale de support aux SO serait alors bien mieux cernée.

Pour tous les Services d'observation, tous domaines confondus, le budget alloué par le CNRS-INSU est de l'ordre de 3M€ par an environ, les SO SIC représentant environ 500k€ par an. La dotation annuelle par SO SIC varie entre 15 et 50k€ selon des critères qui héritent en partie des usages du passé et ne sont pas forcément très clairs. La Commission observatoire se propose de travailler à mieux définir, au travers des documents dont elle dispose et de visites sur sites à conduire à compter de 2014, les besoins réels de chaque SO, c'est-à-dire à définir un coût minimum annuel ou plus exactement un prix de revient minimum de fonctionnement des SO, en distinguant clairement les coûts consolidés en personnels, les frais de fonctionnement usuels (directs et environnés) et les investissements de base pour l'entretien et la jouvence des matériels et infrastructures. Il est en effet indispensable de connaître ce soutien « minimum » notamment pour assurer la pérennité du service en période de difficultés financières.

Enfin, dans le fonctionnement des SO, on semble généralement occulter tout ou presque du prévisionnel (jouvence, entretien, etc.) alors que la conjoncture actuelle ne va pas dans le sens d'une facilité accrue à rassembler les budgets nécessaires au maintien des capacités d'observation. Au-delà du simple exercice comptable, qui renforcera le sentiment de responsabilisation au regard de la « mission nationale » des SO, cette rigueur devrait améliorer le portage de tout ou partie des SO vers des instances (Régions, État, Europe) susceptibles de participer au financement de leurs infrastructures et mesures.

■ Moyens humains

Une analyse comparative des SO (gérés par le CNRS-INSU) et des systèmes d'observation, (gérés par d'autres organismes) montrent que les SO sont souvent sous-dimensionnés en termes de moyens humains par rapport, par exemple, aux systèmes d'observation gérés par l'IRD ou l'INRA. Il semble en particulier qu'aucune analyse fonctionnelle (c'est-à-dire chiffrant, pour chaque fonction d'un SO, le pourcentage de temps requis par chaque type de métier) ne soit menée lors de la mise en place d'un SO. Ceci conduit souvent à ce que certaines fonctions ne soient pas assurées ou le soient de façon peu satisfaisante et non professionnelle. C'est par exemple le cas, pour certains SO, des fonctions liées à l'archivage et aux bases de données. Si celles-ci semblent systématiquement avoir été correctement dimensionnées dans les systèmes d'observation IRD ou INRA, elles ne semblent avoir été réellement traitées au

Services d'observation

CNRS-INSU que pour les très gros SO ou les SO rattachés à d'importants OSU ou fédérations (qui ont généralement un centre de données spécifique et commun, comme le SEDOO à l'OMP ou ESPRI à l'IPSL). Il serait opportun de s'inspirer du mode de gestion de certains de nos partenaires institutionnels pour mieux dimensionner les moyens nécessaires à la mise en œuvre d'un SO SIC avant toute prise de décision sur sa création. En particulier, une vraie analyse fonctionnelle associée à une analyse métier semble indispensable pour asseoir ces SO sur des bases solides.

Il est établi que la section SCOA du CNAP ne pourra pas, dans les années à venir, honorer les demandes en encadrement formulées par les SO. De même, nous sommes dans une phase où les personnels techniques CNRS sont plutôt compressibles mais peu extensibles. Enfin, malgré l'existence des OSU, on note une très faible implication des universités dans la fourniture de personnels dédiés au fonctionnement des SO. Il y aura donc très probablement dans les années à venir une limitation du nombre des SO due à la réduction des moyens humains disponibles pour les faire fonctionner. Les regroupements de SO et la mutualisation des tâches qui peuvent l'être (bases de données, activité de contrôle qualité, développement métrologique, etc.) pourrait permettre de limiter le manque de personnel dédié.

■ Internationalisation

Compte tenu de ce contexte sans doute appelé à durer, il est clair qu'il va être très difficile de maintenir dans la durée les Services d'observation sans source additionnelle de moyens. Le statut d'Infrastructure de recherche est une perspective possible au niveau national. L'autre possibilité (non exclusive de la précédente) est le niveau européen qui peut être susceptible, au travers de programme comme GMES/COPERNICUS, de labelliser la « fourniture de données environnementales » et de forcer ainsi (et donc de stabiliser) le financement national. Au-delà du seul aspect « moyens », cette internationalisation des Services d'observation est aussi une source forte de dynamisme scientifique et d'exigence de qualité pour les observations réalisées.

Néanmoins, tendre vers cet objectif nécessite de prendre en compte les contraintes liées à ce que souhaite l'Europe et donc à s'organiser en conséquence. Or, l'Europe veut des données (pas des systèmes d'observation), des bases de données de taille suffisante (en gros regroupant les variables caractérisant un milieu et non des données dispersées par SO ou sites), des données qualifiées suivant des procédures d'assurance qualité établies, etc.

Il semble difficile, dans leur organisation actuelle, de porter les SO SIC vers l'Europe et plus généralement vers l'international. En effet, même si l'implication et l'intérêt suscités par la recherche induite du fonctionnement des SO SIC au niveau international sont manifestes, les SO mériteraient une structuration de type fédératif, du genre SOERE, qui leur donne une assise plus large ou une meilleure lisibilité internationale. Par ailleurs, il est également important que les SO individuels s'insèrent dans les réseaux internationaux d'observatoires et les infrastructures transnationales chaque fois que c'est possible. Cela suppose :

- de mettre ces SO en réseau au niveau national afin de leur donner une ambition scientifique suffisante (voir ci-dessus), de discuter le caractère multi-paramètres des sites et d'engager des comparaisons entre sites dans le but de compléter les observations, voire de se partager les tâches et les variables mesurées ;
- de conduire une action de recensement des réseaux internationaux d'observation des surfaces et interfaces continentales ;
- de mettre en place un suivi de la qualité des données produites, reposant si possible sur des protocoles reconnus et avalisés au niveau international.

■ Point spécifique

En termes de perspective, un programme de recherche inter-domaines du CNRS-INSU, voire inter-instituts, sur l'expérimentation et la métrologie serait très utile pour le développement des SO, les procédures d'assurance qualité, voire la réduction des coûts (par exemple par l'automatisation des mesures). À noter que le Défi « instrumentation aux limites » récemment lancé correspond pour partie (mais pour partie seulement) à ce besoin.

■ Liste des systèmes d'observation répertoriés dans le texte

OSR	Observatoire spatial régional
OHMCV	Observatoire hydrométéorologique méditerranéen Cévennes-Vivarais
URBIS	Environnement urbain : un système d'observation et d'expérimentation sur le long terme en environnement urbain centré sur l'hydrologie
AMMA-Catch	Analyse multidisciplinaire de la mousson africaine, couplage de l'atmosphère tropicale et du cycle hydrologique
OHGE	Observatoire hydro-géochimique de l'environnement
BVET	Bassins versants expérimentaux tropicaux
HYBAM	Contrôles géodynamique, hydrologique et biogéochimique de l'érosion/altération et des transferts de matière dans le bassin de l'Amazonie
GLACIOCLIM	Glaciers, un observatoire du climat
OBSERA	Observatoire de l'érosion aux Antilles
DRAIX	Hydrosystèmes méditerranéens de montagne : hydrologie, érosion, végétation et flux géochimiques
KARST	Service national d'observation du karst
H+	Réseau national de sites hydrogéologiques

GLACPE	Grands lacs peri-alpins
MSEC3	Multiscale environmental changes
OPE	Observatoire pérenne de l'environnement
ORACLE	Observatoire de recherche des bassins versants du Grand et du Petit Morin
ACBB	Agro-écosystèmes, cycles biogéochimiques et biodiversité
PRO	Produits résiduaux organiques
OMERE	Observatoire méditerranéen de l'environnement rural et de l'eau
AGRHYS	Agro-hydro systèmes
F-ORE-T	Observatoire de recherche en environnement sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers
TOURBIERES	Fonctionnement des tourbières tempérées et impact des changements globaux

CORAIL	Observatoire des récifs coralliens de Polynésie et du Pacifique
SYNAPSES	Système de surveillance automatisé de la physicochimie en estuaire de la Seine
SONEL	Système d'observation du niveau des eaux littorales
SODYC	Service d'observation dynamique du trait de côte
LTC	Service d'observation littoral - trait de Côte

Grands instruments, plateformes et outils nationaux

Le domaine des SIC nécessite de coupler des approches à de multiples échelles de caractérisation, depuis le bassin versant jusqu'à la spéciation à l'échelle moléculaire. Les paramètres et variables à mesurer sont complexes et demandent à la fois des installations sur sites naturels et des outils de laboratoires de plus en plus performants.

Nous n'aborderons pas ici le cas des dispositifs d'observation, lesquels font l'objet du chapitre précédent, mais nous focaliserons sur les plateformes expérimentales communautaires, qu'il s'agisse de plateformes analytiques, d'écologie expérimentales ou de génomique environnementale (en lien avec le CNRS-InEE pour la génomique).

Nous ferons le point sur les évolutions depuis l'état des lieux brossé en 2006. Puis nous aborderons la question des verrous techniques ayant émergé depuis cette période et tenterons de proposer des priorités concernant les besoins actuels d'instruments et de dispositifs expérimentaux devant faire l'objet d'un effort significatif de la part de la communauté nationale SIC et du CNRS-INSU plus généralement.

■ Évolution des dispositifs depuis 2006

• Plateformes analytiques

Les questions scientifiques abordées par le domaine des SIC ne peuvent être résolues sans une caractérisation des processus à différents niveaux d'intégration. Cette recherche bénéficie depuis longtemps, au sein du CNRS-INSU, d'une politique de développement de plateformes analytiques (appel d'offres « mi-lourds » par exemple). Comme indiqué en 2006, cela se traduit par la participation à de très grands équipements comme les synchrotrons et par le co-financement d'équipements de taille moyenne, installés dans les laboratoires mais à vocation nationale, et de plateformes de taille plus réduites essentiellement géochimiques. La liste des plateformes « CNRS-INSU », donnée en fin de chapitre, a en fait peu évolué depuis 2006, reflétant les contraintes budgétaires de ces dernières années.

Cependant, outre ces plateformes dans lesquelles le CNRS-INSU est fortement impliqué en termes de co-financement (achat des appareils, fonctionnement, création de postes de personnels techniques), un ensemble d'autres plateformes existe qui a été enrichi suite aux investissements d'avenir, entre autres. Il existe également de nouvelles plateformes issues des investissements d'avenir EQUIPEX. Un bilan de ces plateformes pouvant servir notre communauté scientifique reste difficile à établir, dans la mesure où elles sont encore dans leurs phases d'installation et de développement, et que leur ouverture aux SIC dépendra de chaque comité de pilotage. CRITEX (Parc national d'équipements innovants pour l'étude spatiale et temporelle de la zone critique des bassins versants) apporte une réponse forte aux besoins

d'instrumentation des SOERE « Réseau de bassins-versants » et « Réseau international de sites hydrogéologiques ». Notons que ECOX, qui permettra de construire une nouvelle ligne de lumière FAME2 à l'ESRF et de nouveaux détecteurs, et que NANOID, qui a permis de créer une plateforme d'imagerie RX en 3D allant de la micro-tomographie à la nano-tomographie (50 nm), seront ouvertes à la communauté.

Les verrous techniques et scientifiques identifiés en 2006 ont en partie évolué. Par exemple, le développement depuis une décennie d'outils spectro-microscopiques permet désormais d'aborder l'évolution de la spéciation des contaminants inorganiques à des échelles micrométriques et même nanométriques. Ces appareils, qui ne fonctionnent que sur synchrotrons ou plateformes nationales, se « démocratisent » depuis quelques années. Plusieurs laboratoires ont pu notamment acquérir des microscopes à fluorescence X. De plus, les plateformes naissantes ou en cours de construction en 2006 sont maintenant parfaitement opérationnelles (Nano-SIMS, ASTER...).

Dans le domaine de l'analyse géochimique (spectrométrie de masse), notre communauté a fait un effort conséquent depuis 2006 dans deux directions : d'une part, le développement de la géochimie des isotopes stables non traditionnels de métaux traces (Hg, Zn, Cu, Cd...) ou d'éléments majeurs (Mg, Ca, Si, Fe...) offrant à la communauté de nouveaux traceurs de sources ou de mécanismes et d'autre part, la réalisation de couplages de machines. Le laboratoire LCABIE de Pau a notamment joué un rôle fondamental en développant de nombreuses techniques et en formant des chercheurs et ingénieurs qui se retrouvent aujourd'hui dans divers laboratoires de notre communauté, impulsant cette dynamique. Ces couplages (par exemple HPLC-ICPMS) ont permis de très fortes avancées dans le domaine de la spéciation

chimique des éléments en solution, par exemple dans le cas des eaux de drainage de mines. Des développements prometteurs sont attendus dans les années à venir concernant les couplages entre chromatographie en phase gazeuse (GC) et spectromètres pour les isotopes stables légers (IRMS) ou les isotopes stables plus lourds (MC-ICPMS). Par exemple, une des voies prometteuses de développement est l'analyse isotopique des éléments légers et lourds au sein des macromolécules organiques, qu'elles soient biogènes ou d'origine anthropique.

Afin de pouvoir utiliser durablement ces « nouveaux isotopes » pour répondre à des problématiques du domaine des surfaces et interfaces continentales, la communauté doit encore réaliser un inventaire des compositions isotopiques dans la nature afin d'identifier les signatures des réservoirs naturels. Il s'agit d'être en mesure de les relier aux phases/molécules/organismes hôtes des éléments et/ou aux processus à l'origine des fractionnements isotopiques observés. Un travail d'expérimentation en laboratoire devra également se poursuivre afin d'identifier les mécanismes responsables des fractionnements, ainsi qu'un travail de modélisation numérique *ab initio* afin de reproduire les fractionnements isotopiques observés, tout en déconvoluant et hiérarchisant les influences respectives des paramètres bio-physicochimiques de contrôle.

Ces plateformes ont un double rôle : d'une part, elles permettent des analyses routinières (techniques analytiques éprouvées) et d'autre part elles offrent à la communauté la possibilité de développer de nouvelles méthodes d'analyse, d'observation et de caractérisation et ainsi d'élargir les perspectives de recherche. Le fonctionnement de ces plateformes repose sur une collaboration étroite entre les personnels techniques et les chercheurs des laboratoires. Un atelier annuel CNRS (ISOTRACE : Spectrométrie de masse en sciences de la Terre) permet une rencontre régulière entre chercheurs, ingénieurs et techniciens de la communauté et industriels du secteur. Le succès de cet atelier témoigne du dynamisme de la communauté directement concernée par ces aspects analytiques.

Cependant, de nombreuses faiblesses existent encore, qui doivent être prises en compte afin que notre communauté reste aussi créative et productive qu'aujourd'hui et soit au cœur de la compétition internationale.

• Plateformes expérimentales d'écologie

Si les dispositifs d'observation sont essentiels au domaine des SIC, les plateformes expérimentales de type mésocosmes et écotrons permettent d'étudier les réponses d'écosystèmes aquatiques ou terrestres à des perturbations environnementales

en conditions contrôlées. Ces outils spécifiques sont indispensables à l'identification des mécanismes réactionnels biogéochimiques mis en jeu et des interrelations entre espèces. Le bilan de 2006 indiquait la mise en place de plusieurs installations fortement soutenues par le CNRS-InEE (<http://www.cnrs.fr/inee/outils/ecotrons.htm>) comme :

- les ÉCOLABS de Foljuif (intégrées au Centre de recherche en écologie expérimentale et prédictive de Foljuif); il s'agit de chambres climatiques permettant d'analyser la réponse d'écosystèmes terrestres ou aquatiques (depuis 2008);
- bassins aquatiques de Foljuif, qui permettent l'étude du fonctionnement des écosystèmes d'eau douce;
- l'écotron de Montpellier-Baillarguet, avec un plateau macrocosme et un plateau microcosme; il s'agit d'une infrastructure du CNRS-InEE;
- la plateforme côtière MEDIMEER de Montpellier - Sète, dédiée à l'étude du fonctionnement et de la productivité des écosystèmes marins côtiers et lagunaires soumis à des forçages physiques, chimiques et biologiques.

Si la mise en place de ces dispositifs est relativement récente pour la communauté française (ce qui n'est pas le cas pour d'autres communautés scientifiques d'Europe du Nord ou d'Amérique), EC2CO a reçu des projets utilisant ces plateformes. Par exemple, le projet PHOCSAPASS tire bénéfice des Écolabs de Foljuif (CEREEP). La proportion de projets portés par des chercheurs de notre communauté et utilisant ces plateformes reste néanmoins encore faible et devra progresser dans le futur.

Depuis 2006 la tendance à la création de tels dispositifs, s'est accentuée. Par exemple, la création de la plateforme ROVALTAIN dédiée à la toxicologie environnementale et à l'écotoxicologie. Les bâtiments sortent de terre depuis peu et la plateforme sera opérationnelle dans les années à venir. D'autres plateformes dédiées à des questions plus ciblées ont été créées depuis 2006. On peut par exemple citer la plateforme de cases lysimétriques du GIFSI en Lorraine sur des sols fortement anthropisés et les mésocosmes aquatiques du GDRi iCEINT (International center for environmental implications of nanotechnologies) développées en partenariat avec tous les membres de ce GDRi localisés sur Aix-en-Provence (CEREGE), Toulouse (ÉCOLAB) et Metz (LIEC) et dont l'objectif est d'étudier l'impact des nanoparticules (contaminants émergents).

La communauté SIC semble donc combler son retard. Les enjeux pour les années à venir seront moins de développer de tels dispositifs, même s'il existe encore des besoins, que de favoriser leur accès et leur fonctionnement optimal. Cette tâche nécessitera

des rapprochements avec le CNRS-InEE et une publicité efficace sur l'existence de tels dispositifs auprès de la majorité des chercheurs.

• Plateformes de génomique environnementale

Les approches dites « omiques » ont connu un essor remarquable depuis une dizaine d'années, lequel avait été prédit lors de la prospective de 2006. En revanche, ce développement n'a pas forcément suivi le chemin imaginé en 2006, avec par exemple des recommandations de création de plateformes avec séquenceurs de nouvelles générations. Le développement très rapide des outils (kits de laboratoire...) a en effet permis de proposer des solutions moins coûteuses et adaptées à l'échelle du laboratoire. La nécessité de créer des plateformes doit donc être rediscutée. De plus, ces outils ne peuvent pas être soutenus seulement par le CNRS-INSU. Un lien étroit avec le CNRS-InEE est indispensable.

■ Verrous, faiblesses et priorités

Suite à ce bilan de l'évolution des plateformes depuis 2006, il reste à dresser la liste des verrous actuels et à définir des priorités, qu'il s'agisse des aspects techniques et scientifiques ou des aspects plus organisationnels.

• Plateformes analytiques

Le bilan depuis 2006 montre une réelle évolution quantitative et qualitative des plateformes à vocation nationale. Ces plateformes permettent désormais d'aborder la dynamique des éléments et des contaminants jusqu'à l'échelle micrométrique. La communauté utilisant par exemple les outils ayant une forte résolution spatiale, qu'il s'agisse d'outils utilisant le rayonnement synchrotron telle la micro-spectroscopie RX (micro-XANES, micro-EXAFS, micro-XRF, micro-DRX...) ou des faisceaux ioniques ou électroniques, s'est élargie. Les développements actuels tendent pour beaucoup vers une diminution de la taille de faisceau, passant ainsi du micro vers le nano.

Afin néanmoins d'identifier les verrous pour les prochaines années, il convient de mieux définir les contraintes que nous rencontrons dans nos thématiques. Par exemple, la figure 1 illustre les points majeurs à considérer dans le cas des études de contaminations environnementales.

Ainsi si la taille de sonde est importante, il semble que la sensibilité des outils le soit tout autant, sans pour autant être la priorité des développements actuels. L'un des verrous concerne donc plutôt le développement ou l'acquisition de détecteurs capables d'étudier des teneurs en éléments plus réalistes par rapport aux teneurs

Cas des Contaminations Environnementales

- Faibles niveaux (ex : ng/L) (sensibilité – traces et ult)
 - Cas des hormones stéroïdiennes : effets toxiques au ng
 - NQE : endosulfan 0,5 ng/LIII
- Matrices complexes
- Multi-contaminants - Mélanges } (spécificité / mult
- Lien présence - effets ?
 - Réactivité
 - Biodisponibilité
 - Synergie/Antagonisme

Figure 1. Spécificités des études autour des contaminations environnementales.

du milieu naturel et donc plus faibles. Cela est particulièrement vrai pour les outils développés sur rayonnement synchrotron. Le projet ECOX (Investissements d'avenir – EquipEx) tente d'apporter un élément de réponse (par le développement de spectromètres à fluorescence X à haute résolution en énergie), mais d'autres solutions technologiques doivent être envisagées. Cela signifie aussi que la communauté devrait considérer ce point comme une priorité et se mobiliser pour son financement. Plus clairement, il faut que ces outils puissent être sensibles à des concentrations locales inférieures au ppm.

Les développements actuels cherchent à passer de la caractérisation en 2D à la caractérisation en 3D. Le grand avantage par exemple de la tomographie RX est d'étudier différentes zones d'un matériau sans avoir à le modifier par de multiples préparations (inclusion en résine, coupes...). L'EquipEx Nano-ID permet de franchir ce pas. Il s'agit d'une plateforme rare en science de l'environnement et à l'échelle du laboratoire, regroupant un micro-tomographe, un nano-tomographe ayant une résolution de 50 nanomètres et une plateforme de cinq outils de micro-caractérisation (micro-XRF, ICP-MS couplé à l'ablation laser...). Cette évolution vers la 3D pourrait aussi se mettre en place autour des lignes de lumière soutenues par le CNRS-INSU.

Outre l'utilisation d'un seul type d'outil, l'avenir est à la combinaison des modes de détection sur une même zone. Cela est bien évidemment possible sur synchrotron, mais ce développement franchit désormais les portes du laboratoire. Ainsi, il est possible de coupler les spectrométries moléculaires (micro-FTIR, micro-RAMAN) à des microscopes à force atomique.

Cependant, l'une des faiblesses identifiées au sein de notre communauté concerne les modes de traitement des données, qui sont également un verrou essentiel pour le développement des outils « omiques ». Les outils modernes permettent l'acquisition de très larges jeux de données, mais l'utilisation des analyses statistiques puissantes développées en chimométrie, comme Simplisma, reste trop modeste. Le développement de l'imagerie

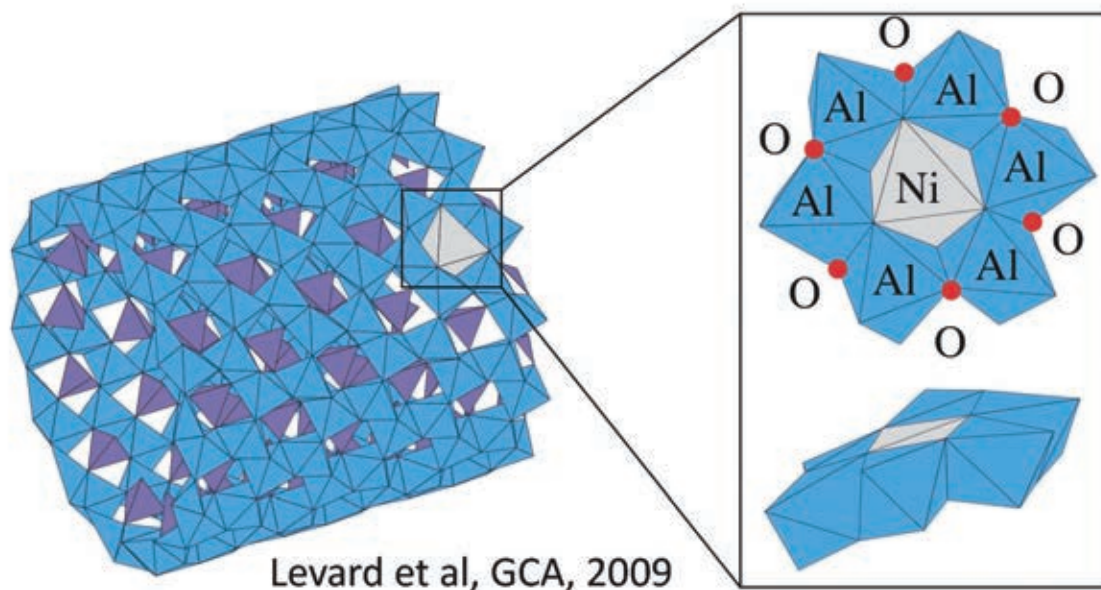
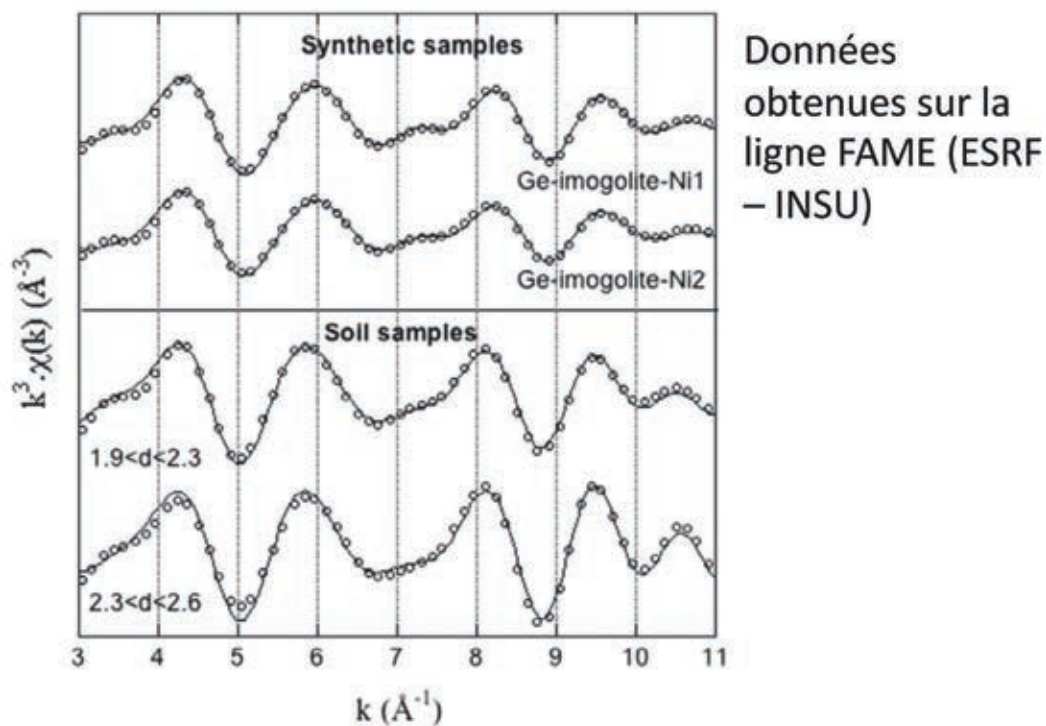


Figure 2. Structure atomique de Ni dans un andosol comparée à un composé de référence (Ni adsorbé sur des imogolites (nanotube nature)). © Levard et al., *Geochimica Cosmochimica Acta*, 2009

vers la 3D va demander des efforts particuliers. Il existe déjà des outils puissants de traitement des données, mais les équipes SIC ne sont peut-être pas toujours au cœur de ces développements analytiques. Des rapprochements avec des équipes de chimistes (chimométrie) et de biologistes statisticiens, afin de créer des plateformes de calcul, pourraient se révéler pertinents. En outre, avec les nouveaux outils, le stockage des données représente un second verrou. Ce point, qui est transverse, ne sera pas ne

développé ici, mais soulignons qu'il devra être traité dans le prochain exercice de prospective.

En ce qui concerne l'accès aux grands instruments comme les lignes de lumière synchrotron, si la communauté CNRS-INSU au sens large est très présente, la communauté SIC l'est proportionnellement moins. Il semble donc important que des actions de sensibilisation soient menées pour élargir le nombre

Grands instruments, plateformes et outils nationaux

d'utilisateurs potentiels. Afin de promouvoir les SIC et les sciences de l'environnement sensu lato, des actions doivent aussi être menées au niveau des décideurs et donc des directions du CNRS-INSU, en lien avec les directions des synchrotrons SOLEIL et ESRF.

Enfin, il semble important d'établir un bilan des moyens nationaux soutenus par le CNRS-INSU depuis de nombreuses années. Il apparaît crucial, en ces temps de contrainte budgétaire forte, d'évaluer si les besoins ont évolué et si les plateformes répondent toujours au mieux des attentes. Faut-il élargir l'offre avec par exemple des plateformes nationales AFM, tomographie? Faut-il revoir le modèle «économique»? La Commission instruments nationaux va s'atteler à cette tâche.

En termes de moyens humains et matériels, les enjeux sont les suivants :

- maintenir des personnels techniques (ingénieurs et techniciens) assurant le fonctionnement de ces services ;
- dégager des financements permettant d'acquérir des appareils analytiques innovants ou simplement d'assurer la jouvence d'appareils actuels pour permettre aux laboratoires de maintenir leur potentiel analytique.

Ces plateformes ont un double rôle : d'une part elles permettent des analyses routinières (techniques analytiques éprouvées) et d'autre part elles offrent à la communauté la possibilité de développer de nouvelles méthodes d'analyse, d'observation et de caractérisation qui élargissent ses perspectives de recherche. Le fonctionnement de ces plateformes repose sur une collaboration étroite entre les personnels techniques et les chercheurs des laboratoires.

• Plateformes expérimentales d'écologie

La prospective CNRS-InEE de décembre 2012 dans le domaine de l'écotoxicologie rappelle, comme nous venons de le faire précédemment, que plusieurs plateformes ont vu le jour depuis moins de 10 ans.

Ces dispositifs sont parfaitement complémentaires des études menées *in situ* dans le cadre des SOERE par exemple, car ils permettent d'acquérir des informations, de manière plus reproductible et à haute fréquence, sur les réponses des systèmes aux perturbations appliquées. Les dispositifs actuellement en

fonctionnement semblent focaliser leurs travaux plutôt autour de questions portant sur le fonctionnement des écosystèmes. Il apparaît que ces plateformes sont peu adaptées à l'étude de stress chimiques et à la manipulation de stress multiples. La plateforme ROVALTAIN pourra combler ce déficit puisqu'il s'agit de la première tentative de création d'un grand instrument dédié à des questions d'écotoxicologie. La mise en place d'outils plus modestes doit néanmoins persister, autour de questions ou d'objets ciblés, ou d'expérimentations dédiées permettant la manipulation de stress multiples, tels que le développement de mésocosmes en réseau permettant d'appréhender les transferts trophiques dans des milieux complexes (eaux douces *versus* milieux intertidaux et milieux marins).

D'un point de vue organisationnel, de nombreux progrès peuvent être apportés. En effet, la communauté SIC manque d'information sur l'existence de ces plateformes et leurs modes de fonctionnement. EC2CO pourrait promouvoir un plus grand nombre de projets tirant bénéfice de ces plateformes. Comme il l'a été énoncé plus haut, une meilleure synergie entre les instituts du CNRS est également indispensable afin d'optimiser et pérenniser l'utilisation et la maintenance de ces plateformes souvent gourmandes en ressources.

• Les capteurs *in situ*

Un autre enjeu majeur de notre communauté pour les 10 prochaines années est le développement des nano et micro-capteurs *in situ*. Ces développements sont fondamentaux pour lever des verrous et permettre d'améliorer la connaissance de certains processus biologiques ou physicochimiques se déroulant notamment aux interfaces. Par exemple, la compréhension du cycle diurne de métaux (Cu, Zn) au sein des rivières nécessite le développement de capteurs *in situ* à haute fréquence. Ces capteurs sont également fondamentaux pour l'optimisation et la pérennisation des suivis menés au sein de systèmes d'observation (CNRS-INSU et autres). Ils permettront par exemple de mesurer des paramètres qui ne peuvent être mesurés qu'*in situ* ou encore de réduire certains coûts de fonctionnement. Néanmoins, ils devront répondre à un cahier des charges intégrant de fortes contraintes (pression, température, haute fréquence d'analyse, robustesse et fiabilité...). Ces capteurs sont aussi potentiellement importants dans de nombreux autres domaines (agro-alimentaire, agrochimie, systèmes embarqués...), d'où le besoin de fédérer les moyens financiers pour des objets d'intérêt partagé.

■ Liste des grands instruments, services, plateformes et outils nationaux ST et SIC

• Infrastructures de recherche (IR)

ESRF ligne FAME

(<http://www.esrf.eu/UsersAndScience/Experiments/CRG/BM30B/>)

Installation européenne de rayonnement synchrotron (the French absorption spectroscopy beamline in material and environmental sciences)

Référent : CNRS

L'ESRF, centre de recherche européen associant dix-sept pays, est la source de lumière synchrotron la plus puissante d'Europe. La ligne de lumière FAME est fortement soutenue par le CNRS-INSU.

IAGOS : In-service aircraft for a global observing system

(<http://www.iagos.fr/web/>)

Référent : CNRS-INSU

IAGOS vise à mettre en place, en collaboration avec des compagnies aériennes, un réseau d'une vingtaine d'avions de ligne équipés d'une instrumentation entièrement automatique dédiée à la collecte d'observations de la composition de l'atmosphère et de la surveillance du climat.

ICOS : Integrated carbon observation system

(<http://icos-infrastructure-france.lscce.ipsl.fr/>)

Référent : CNRS-INSU

ICOS fournit les observations long terme nécessaires à la compréhension de l'état actuel et à prédiction des comportements futurs du climat, du cycle global du carbone et des émissions de gaz à effet de serre.

• Moyens nationaux en géochimie et minéralogie

Microscopie électronique en transmission (MET)

(<http://umet.univ-lille1.fr/CCM/>)

Cet instrument national donne accès à la microscopie électronique en transmission aux chercheurs du CNRS-INSU. Il regroupe deux centres, l'un à Lille et l'autre à Marseille, disposant des personnels spécialisés pour assister les utilisateurs, des équipements nécessaires à la préparation des échantillons...

Microsonde ionique IMS 1270

(<http://www.crpq.cnrs-nancy.fr/Sonde/intro-sonde.html>)

La sonde ionique est un instrument d'analyse construit pour mesurer, à l'échelle microscopique, les concentrations et les compositions isotopiques de tous les éléments connus, même à des teneurs très faibles. (Localisation CRPG Nancy)

Presse multi-enclumes

(<http://www.obs.univ-bpclermont.fr/lmv/labo/pressME/pressme.php>)

La presse multi-enclumes du Laboratoire magmas et volcans, instrument national du CNRS, permet de générer des pressions et des températures comprises entre 3 et 26 GPa, ce qui correspond aux conditions du manteau supérieur, de la zone de transition et de la partie supérieure du manteau... (Localisation Laboratoire magmas et volcans, Clermont Ferrand)

SARM : Service d'analyse des roches et des minéraux

(<http://helium.crpq.cnrs-nancy.fr/SARM/>)

Le Service d'analyse des roches et des minéraux du CNRS est un laboratoire de service à la recherche qui fait partie du Centre de recherches pétrographiques et géochimiques (CRPG Nancy). Il est composé d'un laboratoire de spectrochimie et d'un laboratoire de chimie.

Sonde ionique nanoSIMS 50

(<http://lmcm.mnhn.fr/instruments.htm>)

La sonde ionique NanoSims 50 (CNRS-MNHN) est hébergée au service de spectrométrie de masse isotopique qui fait partie du Service d'analyse isotopique du Muséum national d'histoire naturelle de Paris.

Spectromètre de masse à source plasma ICP-MS

(<http://lgtpe.ens-lyon.fr/techniques-de-recherche/spectrometres-de-masse>)

Le Nu1700, troisième spectromètre de masse à source plasma ICP-MS au monde à vraie haute résolution et multi-collection, est installé au Laboratoire de géologie de Lyon. Cet instrument permet de faire des mesures isotopiques de haute précision sur des éléments habituellement soumis à interférences avec ce genre de machines (Fe, S, Si, Mg, Cu...).

• Moyens nationaux en géochronologie

Laboratoire de mesure du carbone 14

(<http://www-lmc14.cea.fr/>)

Le Laboratoire de mesure du carbone 14 est une unité mixte de service, créée autour d'un nouveau spectromètre de masse par accélérateur (SMA) dédié à la mesure du ¹⁴C. Le LMC14 est implanté sur 2 sites : le SMA, sur le site de Saclay, et le LSCE,

sur le campus du CNRS à Gif-sur-Yvette, où sont préparés les échantillons.

Laboratoire national des nucléides cosmogéniques

(<https://www.cerege.fr/spip.php?rubrique43>)

Le Laboratoire national des nucléides cosmogéniques (LN2C) est formé de deux composantes : ASTERisques (Accélérateur pour les sciences de la Terre, l'environnement et les risques) et une composante «Préparation des échantillons» nommée IdéeFixe. (Localisation Europôle Méditerranéen de l'Arbois, Aix en Pce (CEREGE))

• Moyens nationaux en géophysique

Gmob : Parc de gravimètres mobiles

(<https://gmob.dt.insu.cnrs.fr/spip/>)

Gmob, parc de gravimètres mobiles, est un parc instrumental de la division technique du CNRS-INSU. Il est composé de 3 types d'instruments : des gravimètres portables, des gravimètres absolus et des gravimètres supraconducteurs.

Parc GPS CNRS-INSU

(<https://gpscope.dt.insu.cnrs.fr/spip/spip.php?rubrique17>)

Le parc mobile de GPS du CNRS-INSU est un ensemble de récepteurs, d'antennes et d'accessoires utiles lors de campagnes de mesure, mis à la disposition de la communauté scientifique dont les projets sont soutenus par le CNRS-INSU. (Gpscope, Division technique du CNRS-INSU, Meudon)

SisMob : Parc sismologique mobile national

(<http://sismob.obs.ujf-grenoble.fr/?lang=fr>)

SisMob est le parc national d'instruments sismologiques mobiles terrestres. Il permet de collecter des données sismologiques sur des objectifs ciblés, en l'absence de stations permanentes, ou de densifier la couverture spatiale des stations permanentes. (contacts : ISterre à Grenoble)

Sismomètres marins (OBS)

(<http://parc-obs.insu.cnrs.fr/>)

Le Parc OBS (Ocean bottom seismometer) : les OBS sont des sismomètres qui sont déployés en mer jusqu'à six kilomètres de profondeur où ils peuvent enregistrer les ondes sismiques pendant près d'un an. (IPGP)

• Moyens nationaux en rayonnement synchrotron

Fame : French absorption spectroscopy beamline in material and environmental science

(<http://www.insu.cnrs.fr/node/3998>)

FAME est une des quatre lignes CRG françaises à l'ESRF (European synchrotron radiation facility) de Grenoble. Soutenue majoritairement par le CNRS-INSU, elle est ouverte à l'ensemble de la communauté des sciences de la Terre et de l'environnement. Ses caractéristiques autorisent des mesures de spectroscopie d'absorption X de plus en plus précises, en particulier sur des éléments très dilués (10 ppm). La mise au point d'un nouveau spectromètre de détection haute résolution a fait progresser la recherche effectuée sur l'instrument. Plusieurs nouvelles possibilités scientifiques s'ouvrent aux utilisateurs au travers de la construction d'une nouvelle ligne de lumière dédiée à ce nouveau type de spectromètre, comme de traquer la spéciation des éléments traces au niveau du ppm.

• Plateformes

C2FN : Centre de carottage et de forage national

(<http://www.insu.cnrs.fr/node/1833>)

Le C2FN (Centre de carottage et de forage national) mutualise toutes les plateformes de carottages du CNRS-INSU et regroupe toutes les forces vives relatives à ces outils en s'appuyant sur les laboratoires concernés.

■ Liens vers le site des Écotrons du CNRS-InEE

Ecotrons du CNRS-InEE

(<http://www.cnrs.fr/inee/outils/ecotrons.htm>)

En France, l'infrastructure de recherche (IR) Écotrons est coordonnée par l'Institut écologie et environnement du CNRS et inclut deux plateformes complémentaires : l'Écotron européen de Montpellier et l'Écotron IleDeFrance. Sa mission est de fournir à la communauté scientifique des dispositifs expérimentaux technologiquement avancés et originaux et permettant de faire progresser la connaissance du fonctionnement des écosystèmes en testant et en développant théories et modèles. Les Écotrons français constituent une nouvelle génération après celle de l'Écotron de Londres à Silwood Park et des EcoCell de Reno dans le Nevada. Ils sont caractérisés par un plus grand nombre d'unités expérimentales mieux équipées et instrumentées, ce qui permet d'étudier statistiquement l'interaction entre facteurs dans de nombreuses conditions. Cette logique répond à une nécessité scientifique car les interactions entre forçages environnementaux sont au cœur du fonctionnement des écosystèmes.

Les outils de la télédétection

De grandes avancées ont été réalisées ces dernières années dans le domaine de la télédétection spatiale qui est aujourd'hui amplement utilisée pour mieux caractériser les SIC à différentes échelles. Grâce à la mise en place de nouveaux services inter-organismes comme le pôle thématique « Surfaces continentales » (THEIA) au niveau national ou des différents centres internationaux de données comme ceux de l'ESA ou de la NASA, les produits spatiaux sont désormais largement accessibles. Ces produits concernent la caractérisation des paysages, la couverture et l'utilisation des sols, mais aussi le fonctionnement des écosystèmes à l'aide de variables comme la température ou l'humidité des sols. Pour la plupart de ces produits, les données sont disponibles, grâce aux nouveaux capteurs, à des échelles spatio-temporelles de plus en plus fines et pour des séries temporelles longues. On peut citer par exemple le produit NDVI à 8 km de résolution du GIMMS qui couvre une période de 25 ans (1981 – 2006).

Cependant, des points de blocage restent à résoudre. Les plus flagrants sont le manque de disponibilité de certains produits (Radarsat, ASTER, par exemple), la frilosité des agences qui préfèrent souvent les concepts « éprouvés » aux concepts novateurs et l'utilisation somme toute faible de ces données, sans parler des aspects géopolitiques qui font penser que le satellite d'une agence est meilleur que celui d'une autre, au point parfois de préférer attendre un futur instrument plutôt que d'utiliser celui existant.

Le plus gros souci de la communauté est bien souvent l'accès à la donnée et ce pour trois raisons : elle est souvent coûteuse (par exemple, SPOT avant le programme ISIS, Pleïades, Radarsat...), quelquefois difficile d'accès (ex. MERIS ou ATSR) et demande parfois des outils spécifiques ou des connaissances particulières pour être analysée. La mise en place de centres ou de pôles comme le pôle THEIA vise à combler ce déficit, mais il faut toutefois rester très vigilant car les « télédéTECTEURS » de ces pôles ont parfois tendance à chercher à fournir des produits « élaborés » sans toujours se préoccuper du véritable besoin des chercheurs et utilisateurs. Par exemple, une donnée physique de base « propre » et caractérisée en termes d'incertitudes ne va pas être systématiquement disponible alors qu'une pléthore de produits complexes et par trop spécifiques est fabriquée à grand frais pour très peu d'utilisateurs potentiels.

Le second problème vient du conflit entre les intérêts stratégiques des agences et les besoins des utilisateurs. On peut ainsi avoir de très beaux instruments en surnombre fournissant tous le même type d'information (un simple regard sur les missions spatiales en cours et prévues montre des redondances parfois criantes), alors

que d'autres variables restent non mesurées. Ce problème est exacerbé par la « compétition » entre les grandes agences, qui se traduit par le désir de faire mieux que ce qui existe (souvent à la marge) plutôt que d'explorer de nouveaux domaines en prenant des risques plus grands. Cette frilosité est flagrante lorsqu'un nouveau concept est soumis. Si de gros progrès ont été accomplis sur ce point, il reste du trajet à parcourir.

Les contraintes techniques, dont nous ne parlerons pas ici, sont aussi un frein à l'acquisition des données (stations de réception, mémoire bord ou débit de télémesure pour ne citer qu'un aspect) et ce souvent pour des raisons de coûts. Il est intéressant ainsi de voir que nous continuons à privilégier des missions dans le domaine optique ayant une revisite réduite alors que nous savons pertinemment que la nébulosité rend toute acquisition utile pour le suivi de la végétation fortement problématique, sinon impossible. Il est aussi intéressant de constater que les missions survolent les surfaces à des heures qui ne sont contraintes que par l'historique (orbite de 10h30, par exemple).

Il semble utile également de faire une remarque sur le coût du spatial. Pour beaucoup, le spatial et la télédétection semblent très coûteux. Un petit satellite coûte 50 M€, un satellite moyen 300 M€ et un gros satellite quelques G€. C'est en effet énorme, mais il faut garder à l'esprit les points suivants :

- ces coûts sont toujours consolidés, ce qui n'est pas souvent le cas des autres systèmes plus classiques ;
- les missions spatiales fournissent le plus souvent des données à de nombreux utilisateurs dans des domaines parfois très différents, leur couverture mondiale permet d'étendre les recherches et/ou d'aborder de nouvelles problématiques dans d'autres régions, ce qui n'est pas forcément le cas d'autres grandes campagnes de mesure, et la disponibilité de données « gratuites » et sans période de rétention permet aussi de les diffuser beaucoup plus vite et à un plus grand nombre, ce qui se traduit le plus souvent par une production scientifique accrue et partagée ; il est de notre devoir de bien exprimer les besoins afin d'optimiser l'utilisation des données et donc les coûts ;
- la plupart du temps, les données couvrent l'ensemble du globe, souvent et longtemps.

Il semble donc important de remettre en question toutes les idées et concepts préconçus, de favoriser les produits de base (réflectances à la surface par exemple) et surtout de chercher comment estimer les variables et paramètres que l'on ne sait toujours pas mesurer depuis l'espace.

Les outils de télédétection

L'observation spatiale est utilisée pour suivre l'évolution des SIC, mais aussi pour comprendre les processus aux interfaces et mieux contraindre leur modélisation. La communauté française est bien placée dans ce domaine, aussi bien sur les aspects amonts de traitement de l'information et d'inversion du signal, que sur les aspects aval d'utilisation/assimilation des données dans des recherches finalisées. Le développement et le soutien pérenne des observatoires nationaux, qui apparaissent comme des atouts forts pour mettre au point et valider ces méthodes, doivent être encouragés. Notamment, des services nationaux labellisés comme l'OSR (Observatoire spatial régional) Sud-Ouest, l'OHM-CV ou encore AMMA-CATCH, qui permettent de documenter les différentes variables SIC en associant mesures in situ et de télédétection et de développer des outils pour mieux observer, comprendre et modéliser le fonctionnement des surfaces continentales, semblent constituer une excellente approche.

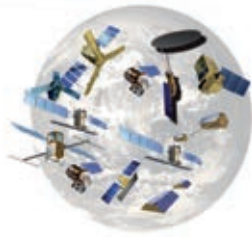
Un certain nombre de verrous scientifiques et méthodologiques subsistent cependant, vis-à-vis desquels il paraît indispensable de favoriser des recherches associant modélisateurs et observateurs. Parmi ces verrous, nous pouvons citer :

- les liens entre les signaux mesurés et les variables des modèles de fonctionnement, qui nécessitent de progresser sur la modélisation des processus et des observables, via les modèles de transfert radiatif et leur inversion, en travaillant sur des sites instrumentés à différentes échelles comme les OSR ;
- le changement d'échelle, la représentativité des mesures et leur adéquation aux processus à quantifier, cette adéquation étant liée à l'échantillonnage spatial et temporel ;
- la quantification des incertitudes (les erreurs des modèles et des observations et leur variabilité spatiale et temporelle) ;
- l'assimilation des données dans les modèles, en particulier les données spatiales multi-échelles et multifréquences, en progressant sur la prise en compte des incertitudes et de leur propagation ;
- le développement et l'exploitation de nouveaux capteurs pour accéder à de nouvelles variables ou améliorer leur estimation, comme l'évapotranspiration, la pluviométrie, les débits des rivières, le métamorphisme de la neige...

Ces développements nécessitent de mettre en œuvre des approches pluridisciplinaires sur des zones ateliers et de progresser dans la mise en réseau des observatoires et dans leur ouverture à l'ensemble de la communauté pour faciliter l'utilisation des données. On constate en effet, qu'un frein à l'utilisation du spatial tient aussi au manque de dialogue entre les communautés. Il est toujours frappant de voir que les utilisateurs potentiels ont une vision très parcellaire et ancienne des potentialités de la télédétection. Inversement, les concepteurs de produits appréhendent mal la spécificité des questions posées par les utilisateurs. Sans travail commun sur des objectifs communs, il ne faudra pas espérer des synergies à moyen terme. Il est également surprenant de voir des modélisateurs utiliser la télédétection de façon presque caricaturale ou des télédéTECTEURS avoir une vision excessivement simpliste des besoins de modélisateurs.

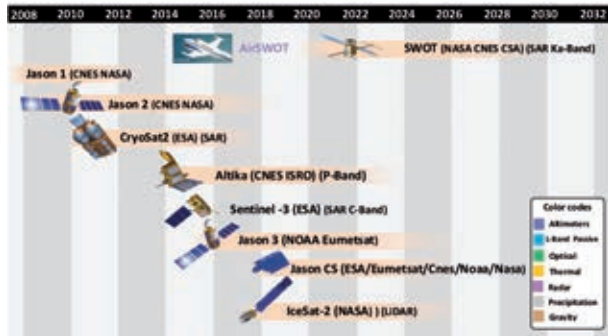
Il importe donc que la communauté s'approprie l'outil télédétection avec ses avantages (qui sont souvent sous exploités), notamment celui de fournir des acquisitions homogènes dans le temps et l'espace (sous couvert d'une utilisation correcte), et avec ses inconvénients, et ce, grâce notamment à des travaux transdisciplinaires sur des sites et verrous scientifiques communs.

Timelines of selected EOS missions



(the presented list doesn't include all missions)

Altimetry missions



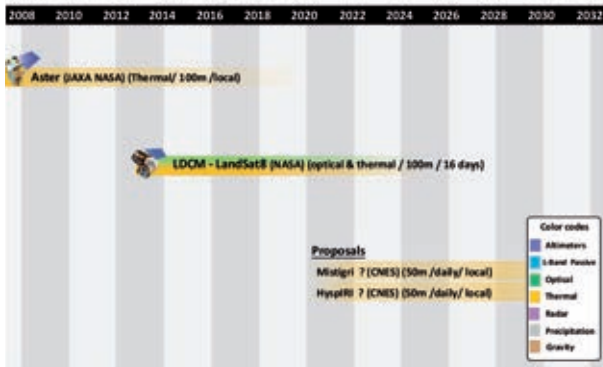
L-Band radiometer missions



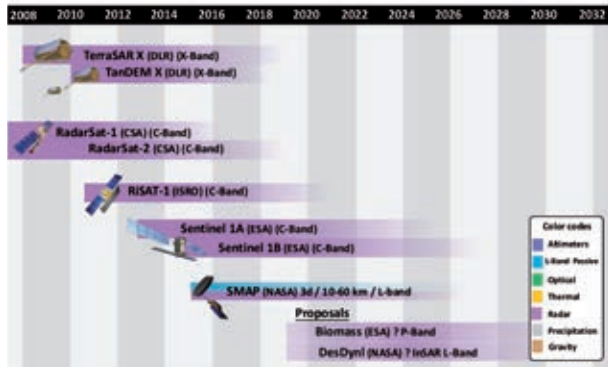
Optical missions



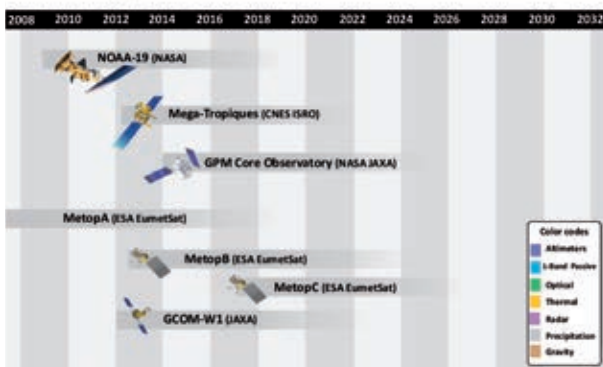
Thermal missions



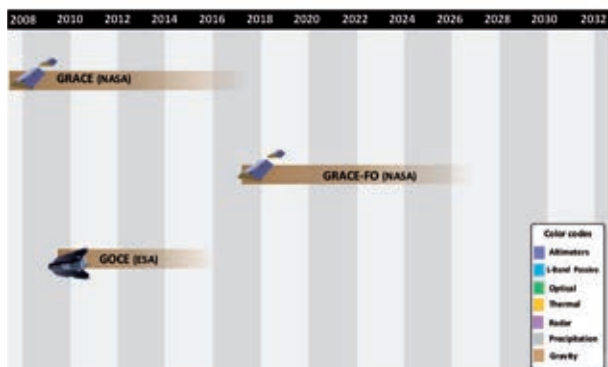
Radar missions



Precipitation missions



Gravity missions

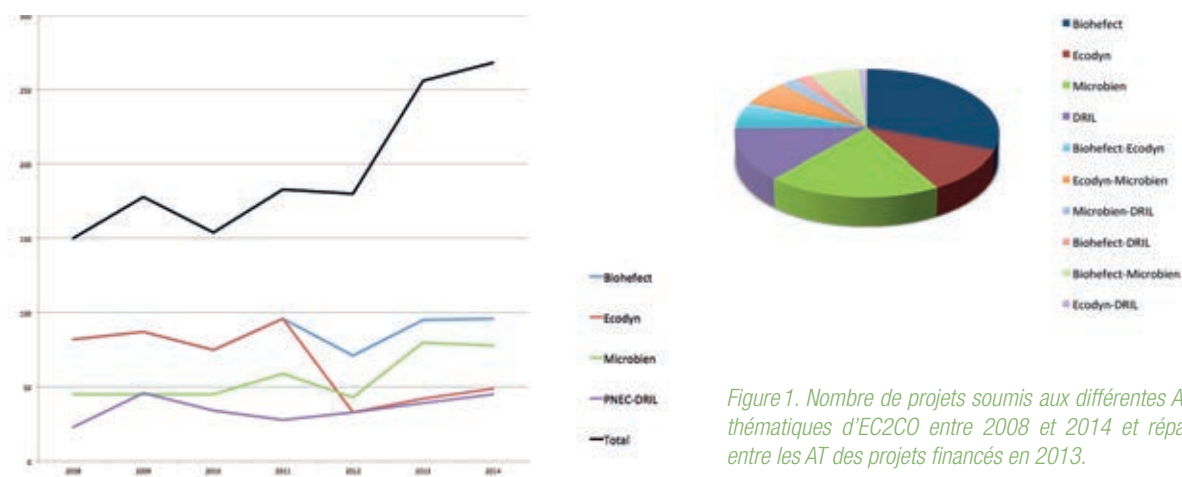


Initiative structurante « Écosphère continentale et côtière » – EC2CO

Le programme EC2CO (Écosphère continentale et côtière) est une Initiative structurante (IS), qui a pour objet de fédérer la communauté scientifique des SIC autour de grandes questions scientifiques fondamentales abordées selon des approches interdisciplinaires, aux interfaces entre hydrologie, écologie et biogéochimie. Comme le soulignent d'autres chapitres du rapport de prospective, l'action EC2CO aborde la zone critique, c'est-à-dire la zone entre la partie supérieure des végétaux et la roche-mère, et les interfaces continent – océan et continent – basse atmosphère. Cette zone critique est sous la dépendance de processus physiques, chimiques et biologiques et répond à différents forçages d'origine climatique, anthropique, etc.

EC2CO a été progressivement modifié au cours des dernières années, notamment au travers des différentes actions qui le structurent et de quelques évolutions thématiques. Le nombre croissant de projets en réponse à l'appel d'offres dans l'Action thématique (AT) CYTRIX (Cycles hydro-biogéochimiques, transferts et impacts écotoxicologiques) a conduit à son remplacement en 2012 par deux nouvelles AT. L'une est dédiée à l'étude des grands cycles biogéochimiques et au fonctionnement des écosystèmes (BIOHEFFECT, Biogéochimie, hydrologie et fonctionnement des écosystèmes), et l'autre à l'écotoxicologie et l'écodynamique des contaminants (ECODYN) (Fig. 1). L'AT PNEC (Programme national environnement côtier) a été remplacée par l'AT DRIL (Dynamique et réactivité des interfaces littorales), qui cible le fonctionnement et l'évolution des systèmes littoraux considérés comme la zone d'interface probablement la plus soumise aux changements

globaux de tous ordres. L'AT MicrobiEN n'a pas été modifiée et aborde le fonctionnement des écosystèmes au travers du compartiment microbien, en regardant tant l'impact du système sur les organismes que l'impact des organismes sur le système. Il faut souligner qu'une action portant sur l'environnement urbain, encore peu étudié et pourtant soumis à des pressions croissantes et considérables, et visant notamment une forte collaboration avec les SHS, a été initiée en 2010. EC2CO a reçu plusieurs déclarations d'intention de très bonne qualité scientifique. Cependant, après compilation, il s'est avéré que la communauté attachée au milieu urbain était trop petite pour qu'une AT d'ampleur nationale puisse être raisonnablement lancée. Les environnements urbains restent néanmoins d'un grand intérêt comme en témoignent plusieurs contributions à la prospective SIC. Il faudra à l'avenir motiver et stimuler la prise en compte de ces milieux au sein des AT d'EC2CO.



La stratégie d'EC2CO étant de soutenir des projets innovants, bien ciblés, interdisciplinaires et à prise de risque, la durée des projets a été réduite depuis 2010 à deux ans maximum. Le nombre de projets soumis à EC2CO continue à augmenter (Fig. 1) et la communauté SIC soutient fortement cette IS qui permet souvent d'initier des projets et de préparer ainsi leur accès à des appels d'offres plus ambitieux. L'analyse des résultats montre qu'en effet, 20 à 30 % des projets sont poursuivis en ANR. Un quart des projets retenus sont communs à plusieurs AT, ce qui montre une interface significative entre celles-ci. En revanche, l'implication potentiellement structurante des systèmes d'observation (SO, SOERE, zone atelier, OHM, Chantier...) dans les projets pourrait être améliorée puisque seulement 20 % des projets sur les deux dernières années utilisent des données de systèmes d'observation.

L'analyse des projets soumis à l'AT Biohefect montre l'existence de projets innovants aux interfaces entre hydrologie, biogéochimie et écotoxicologie, par exemple sur les conséquences des changements globaux sur le fonctionnement des écosystèmes. Elle montre cependant que des verrous et des manques persistent dans l'estimation des incertitudes sur les observations et sur les résultats issus des simulations, dans les études multi-échelles (spatiales et temporelles), multi-disciplines et multi-méthodes de l'hétérogénéité des systèmes et dans la modélisation couplée des processus et des compartiments. Pour l'AT Écodyn, on note l'émergence de projets à l'interface sol-eau portant sur les interactions entre contaminants et processus fonctionnels, mais encore peu de projets sur les transferts inter-compartiments (air – eau, air – sol), sur l'intégration multi-échelle des effets (individu-population-communauté), sur l'impact écotoxicologique lui-

même, sur les mécanismes d'adaptation des organismes et populations ou sur le lien présence-effet et la prédiction («écotoxicologie prédictive»). Pour DRIL, l'analyse montre une grande diversité dans les milieux étudiés (bassin versant, fleuve, interface continent – océan, mangrove...) et les thèmes abordés (biodiversité, compétition, changements climatiques, résilience, aléas, contamination). Elle montre aussi qu'un rapprochement significatif est possible avec l'action interorganisme LEFE dès lors qu'il est question de processus physiques, physicochimiques et biogéochimiques contrôlant la dynamique et la variabilité des milieux sur une large échelle de temps et d'espace. C'est pourquoi une réflexion est actuellement menée entre les actions thématiques de LEFE et d'EC2CO en vue d'un appel d'offres partiellement partagé. En ce qui concerne l'AT Microbien, les projets prennent en compte le rôle, la diversité et la préservation de la diversité des micro-organismes dans les écosystèmes ainsi que les interactions entre micro-organismes ou entre micro-organismes et hôtes, en utilisant des outils performants de nouvelle génération pour accéder à cette diversité. Si les projets dédiés à l'étude de la diversité relèvent plus strictement du CNRS-InEE, les projets qui répondent à l'AO EC2CO et relient diversité et fonction dans les écosystèmes s'intègrent bien dans la problématique SIC, car ils étudient également les micro-organismes impliqués dans le devenir et la transformation des éléments et polluants et dans les fonctions clés des écosystèmes. Les lacunes identifiées concernent la prise en compte des changements d'échelle dans le fonctionnement et la diversité fonctionnelle des micro-organismes, l'action des organismes sur le fonctionnement des écosystèmes, les interactions entre organismes, ainsi que la quantification et la modélisation des processus microbiens.

CRITEX, Équipements d'excellence pour l'étude spatiale et temporelle de la zone critique des bassins versants

Le projet CRITEX récompense un effort collectif visant à doter deux réseaux d'observatoires de l'environnement (RBV et H+) d'un parc national commun d'équipements innovants. Ces réseaux sont respectivement un consortium d'observatoires des bassins versants (précipitations, sol, rivières) et d'observatoires de sites hydrogéologiques (aquifères), localisés dans le monde entier et qui permettent d'étudier, dans la durée et dans sa diversité, la zone critique de la Terre. Cette zone, située entre les roches et le ciel, est la « peau » de la Terre. C'est le milieu de vie de l'humanité. C'est de cette pellicule que nous prélevons nos ressources alimentaires et nos ressources en eau et dans cette interface que finissent la plupart de nos déchets. Cette zone, qui est globalement la zone où l'eau et les gaz interagissent avec les roches et le vivant, est au carrefour de plusieurs disciplines scientifiques et d'un grand enjeu sociétal, tant les problèmes de ressources en eau et des sols deviennent prégnants. Observer dans la durée et mieux comprendre le fonctionnement intégré de la zone critique est un défi scientifique de premier plan, face aux changements de l'environnement, du climat, de la composition atmosphérique, d'occupation et d'utilisation des terres et d'aménagement du territoire.

Le projet CRITEX est un parc commun d'équipements mobiles innovants permettant aux scientifiques des réseaux RBV et H+ de développer de nouveaux prototypes et de nouvelles méthodes d'auscultation de l'environnement (hydrologiques, géophysiques et géochimiques) et de croiser des observations qui, jusque-là, n'étaient pas ou peu fédérées scientifiquement. La rupture innovante qu'introduit CRITEX, et qui relève tout autant de l'originalité des techniques qui vont être déployées que de l'interdisciplinarité qui va en émerger, doit permettre de fédérer la communauté nationale et d'envisager l'étude holistique de la zone critique.

Le projet se structure autour de deux objectifs : le suivi à haute fréquence des différents compartiments de la zone critique (par exemple, l'analyse chimique des rivières) et l'exploration temporelle multi-instrumentale et focalisée sur des zones ou des instants particuliers des bassins versants. L'équipement de

CRITEX est constitué d'instruments nouvellement développés (micro-capteurs chimiques et isotopiques, auscultation sismique de l'eau dans le sol, capteurs d'humidité des sols, scintillométrie micro-onde) et d'instruments existants (tours de flux, sondages électromagnétiques, puits instrumentés) qui seront déployés en parallèle sur des sites bien choisis.

CRITEX associe 4 organismes de recherche (CNRS, IRD, ISTEREA, INRA) et plus de 20 universités. Il est piloté par le CNRS. C'est un outil national dédié aux réseaux de recherche sur les bassins versants, les hydrosystèmes souterrains et plus généralement la zone critique de la Terre. Il accompagne un mouvement mondial pour la surveillance de la surface de la Terre, en particulier des rivières, vues comme des sentinelles de l'environnement, et de leurs bassins versants. Il est la composante française des réseaux américains et européens sur la zone critique (Critical zone exploration network). De ce point de vue, CRITEX vise à améliorer le leadership international de la France.

Du point de vue économique, CRITEX collabore avec plusieurs entreprises, membres de pôles de compétitivité. Il permettra de définir des protocoles d'observation de la surface de la Terre, intégrant la géophysique, la géochimie, l'hydrologie et les échanges entre le sol et l'atmosphère, qui seront utiles dans le cadre des futures lois sur la ressource en eau prenant en compte les activités humaines et le changement climatique.



Défis aux interfaces

Le sol

■ Le sol : une interface FRAGILE

Siège du fonctionnement et de la dynamique des écosystèmes, de la régulation des cycles de l'eau et des cycles biogéochimiques (C, N, P, Si, Fe, Al...), les sols constituent depuis la litière jusqu'à la roche saine, avec la végétation et l'eau souterraine ou courante, la « zone critique de la Terre. Abrisant une biodiversité (micro et macrofaune et flore) encore largement méconnue, ils contrôlent une large part des caractéristiques géochimiques et microbiologiques des eaux et des sédiments, le stockage du carbone organique et les émissions de poussières (sous forme particulaire ou colloïdale, Fig. 1) et de gaz à effets de serre. Fruit d'une genèse lente et complexe impliquant la nature du substrat, les agents biologiques et le climat, ils présentent à la fois une forte hétérogénéité verticale et latérale et une grande diversité à différentes échelles spatiales.

Interface essentielle dans la physiologie terrestre à des échelles de temps longues, la zone critique est la machine à altérer les continents : elle prend la forme d'un tapis roulant se formant à la

base du sol par les réactions bio-physicochimiques d'altération et disparaissant à sa surface par les mécanismes d'érosion (Fig. 2). Bien que les sols soient souvent de piètres enregistreurs de leur propre histoire, certains types de sols conservent néanmoins une partie des archives de l'histoire de l'homme et de son environnement.

Les sols sont le siège de processus souvent rapides de dégradation (érosion, salinisation, acidification, tassement, imperméabilisation, contamination). Indispensables au fonctionnement des écosystèmes, ils assurent des services écologiques fondamentaux (contrôle des transferts d'eau et de solutés, production de biomasse, régulation de la biodiversité ou séquestration du carbone par exemple) *via* les nombreux cycles biogéochimiques et physiques qu'ils contribuent à réguler.

Bien que la complexité des fonctionnements et des fonctions des sols soit unanimement admise, la plupart des approches agronomiques, écologiques, environnementales ou géologiques ne les appréhendent étonnamment que de manière très réductrice, ce qui ne permet pas une compréhension holistique



Figure 1. Vent de poussières de début de saison des pluies (5 juillet) dans le bassin versant de Banizoumbou, région de Niamey au Niger. © IEES, Christian Valentin



Figure 2. Lavaka, région du lac Alaotra à Madagascar, où des glissements de terrain déclenchés par des microséismes ont favorisé la formation de ravines. © IEES, Christian Valentin

des mécanismes contrôlant la dynamique des sols et donc une modélisation de leur fonctionnement. Le sol est encore trop souvent traité comme une « boîte noire » homogène dans l'espace et dépourvue d'histoire et de dynamique, dont l'étude est limitée à quelques dizaines de centimètres d'épaisseur.

De même, les études sur les sols restent trop souvent dictées par des questions finalisées, au dépens de recherches amont pourtant cruciales pour comprendre et prévoir les processus en jeu (quantification, cinétique et modélisation des processus de pédogenèse et d'érosion, vitesse de réponse des sols aux différents changements, spéciation des métaux dans les sols et donc biodisponibilité et biotoxicité d'éléments comme Pb, Cu, Cd, Zn ou As, transferts, redistribution et bilan de matière à différentes échelles d'espace et de temps, couplage des cycles et stœchiométrie écologique). Il s'avère donc nécessaire de mener, dans le cadre des observatoires sur les sols encore trop peu nombreux, une réflexion approfondie sur le choix des paramètres de suivis biotiques et abiotiques et sur les fréquences de mesures, mais également sur l'intégration disciplinaire lors de la conception des systèmes d'observation.

L'idée majeure de la prospective SIC sur le sol est que la recherche (et la formation) sur le sol, en tant que composante de la zone critique de la Terre, doit être réhabilitée et davantage bénéficier d'une fertilisation croisée de l'ensemble des disciplines impliquées, au carrefour des sciences de la vie, de la Terre et de la matière, mais aussi des sciences humaines et sociales. Les diverses disciplines ont développé des outils très performants et très spécialisés pour l'étude du sol (minéralogie, isotopes, matière organique), mais leur intégration reste à faire.

■ Des verrous et des pistes de recherche à privilégier

Les travaux de recherche conduits sur les sols n'ont jamais été aussi fragmentaires et dispersés. Or, les sols constituent par essence un domaine très fertile d'interdisciplinarité, allant de la géophysique superficielle, en passant par la géologie, la géochimie, la géomorphologie, l'hydrogéologie, la microbiologie, l'écologie et l'archéologie jusqu'à l'économie, au droit et à la sociologie. Ainsi, afin de gagner en efficacité, la communauté

des chercheurs des surfaces et interfaces continentales devrait recentrer le *modus operandi* des actions conduites actuellement de manière dispersée sur des projets pluridisciplinaires de plus grande envergure et conduits à plus long terme.

Les géologues, les géochimistes, et les géomorphologues s'intéressent aux sols dans une optique de couplage entre les temps longs (altération et érosion chimique) et les temps courts (érosions mécaniques). Cependant, de nombreuses incertitudes demeurent sur les vitesses relatives de formation et de destruction du sol et sur les processus en jeu, particulièrement ceux liant l'activité biologique à l'altération chimique. Ceci suggère que les sols représentent une cible de choix pour opérer efficacement des études mécanistiques sur des couplages temps longs – temps courts pour notamment : mesurer les vitesses de pédogenèse et les flux d'éléments et de matière associée, déterminer les temps de réponse des sols à des forçages climatiques et anthropiques, et comprendre les processus de pédogenèse (structuraux, dynamiques bio-physicochimiques et bioturbation) pour les modéliser plus efficacement aux échelles spatio-temporelles *ad-hoc*. Ces questions nécessitent de renforcer la compréhension des constantes de temps caractéristiques du système sol et des couplages entre les processus rapides et les processus lents.

Au-delà de la compréhension des mécanismes qui préparent à la formation et à l'évolution des sols, l'identification et la hiérarchisation des facteurs et des processus activés lors de leur détérioration, voire de leur destruction, doivent constituer une préoccupation majeure de notre communauté. À titre d'exemple, comprend-on réellement bien comment l'érosion (hydrique ou éolienne) joue sur la dynamique élémentaire (les pertes, les transferts et les redistributions d'éléments), sur les modifications de réserves hydriques qu'elle génère et donc aussi sur la biodiversité (micro et macrofaune) et sur la qualité des sols et des eaux qui y transitent ?

Les sols jouent un rôle majeur, en particulier dans le stockage et la libération de carbone. Il apparaît dès lors essentiel, non seulement de réaliser les développements métrologiques requis pour maîtriser la mesure des stocks de carbone et des flux de gaz à effets de serre (et donc de travailler sur l'interface sol – basse atmosphère), mais d'étudier aussi les processus de stabilisation/déstabilisation des matières organiques du sol et leur impact sur la dynamique du carbone des sols, en particulier dans les régions du globe soumises à des stress intenses, qu'ils soient climatiques (Arctique) ou dus à l'usage des terres (Asie du Sud-Est). Les modèles climatiques ont plus que jamais besoin d'une meilleure compréhension de la dynamique du carbone, et des gaz à effets de serre associés comme les oxydes d'azote, dans les sols.

La compréhension du système complexe, polyphasique et dynamique «sols» passe par l'identification, la localisation, la caractérisation structurelle et la pérennité des «hot spots» réactionnels, dans la mesure où ce sont ces zones actives qui contrôlent les flux de matière et la stabilité des composants des sols. Ces zones de transferts exacerbés doivent susciter une attention particulière et être étudiées via la mise en synergie de cultures croisées, alliant une maîtrise des processus physicochimiques tracés par des marqueurs couplés (chimiques, isotopiques et moléculaires) ou imagés par des techniques pointues de caractérisation (NanoSIMS, Synchrotron...) à une compréhension des phénomènes biotiques en jeu, *via* notamment d'étroites collaborations avec nos collègues d'écologie microbienne.

Au-delà des processus physicochimiques en jeu, une compréhension holistique du système «sols» ne pourra s'effectuer sans une analyse fine du compartiment vivant des sols et de ses prérogatives. À ce titre, la connaissance des organismes et des chaînes trophiques présents dans les sols, bien que nécessaire, n'est pas suffisante. La question centrale n'est plus tant «qui est là?», mais «qui fait quoi et avec quelles conséquences?» Pour répondre à une telle question, il est nécessaire de développer de nouvelles façons d'étudier la biodiversité dans les sols, avec notamment un fort ancrage sur des données génomiques pour déterminer les fonctions clés assurées par les micro-organismes (cycle des nutriments, stockage du carbone, séquestration, libération ou détoxification de certains micro-contaminants, cycle de l'hydrogène...).

L'analyse mécanistique fine des processus conduisant à l'évolution des sols, depuis la pédogenèse jusqu'à la destruction du sol en passant par des phases de contamination, voire de remédiation, ne pourra faire l'économie d'approches originales permettant, à l'issue de suivis *in situ*, d'isoler certains composés du sol sans perturber leurs propriétés intrinsèques et leur dynamique propre. On peut penser, par exemple, à des dispositifs permettant d'isoler de la microfaune complexe présente dans les sols, des communautés bactériennes spécifiques de par leurs implications fonctionnelles dans certains cycles élémentaires (As, Cr, Hg...).

Un accent doit être mis sur les études axées sur la compréhension de la dynamique des pollutions, tant locales que diffuses, en considérant les sources et leur nature, les spéciations des contaminants (et donc leurs biodisponibilité, voire biotoxicité), les produits de dégradation (notamment pour les contaminants organiques) et leurs temps de résidence ainsi que les trajectoires suivies par les contaminants dans les sols. L'analyse puis la modélisation des interactions entre ces contaminants et des variations spatio-temporelles des propriétés des sols représentent sans doute un challenge majeur. Idéalement, les mécanismes réactionnels de transfert et de toxicité devront être appréhendés

depuis l'échelle moléculaire jusqu'à l'échelle de la parcelle, tout en couplant cette approche à des bilans de flux. Une attention particulière devra être également portée sur le compartiment colloïdal des sols, dont on suspecte qu'il pourrait être un catalyseur de transfert et de biodisponibilité de certains éléments traces, notamment quand les colloïdes en jeu présentent une nature mixte organométallique.

Historiquement très orientées vers l'observation, les études axées sur les sols doivent se tourner vers une théorisation plus marquée, fondée notamment sur des concepts simplifiés qui facilitent la modélisation. Force est de constater que les modèles, en particulier les modèles climatiques, sont assez pauvres dans leur

description des sols. Pour optimiser réellement la pertinence et le réalisme des modèles proposés et ainsi pouvoir bâtir des outils opérationnels de gestion, de conservation et de remédiation des sols, l'accent devra être mis sur la prise en compte des processus affectant la dynamique de la matière organique, les couplages de cycles (C-N-P-S), la minéralogie, le pH, le potentiel redox, les paramètres hydriques, les processus biotiques...

Ceci n'exclut pas pour autant, bien au contraire, la nécessité de suivre à long terme au sein d'observatoires dédiés, l'évolution des sols soumis aux changements d'usage et de climat, afin de disposer de données robustes pour éprouver les nouveaux modèles dynamiques proposés.

Articulations temps courts/ temps longs : l'héritage et l'enseignement du passé pour mieux prédire le futur

A lors que repose sur la communauté scientifique la tâche d'évaluer la dynamique future des surfaces et interfaces continentales (SIC) en réponse au changement climatique et aux perturbations environnementales d'origine anthropique, paradoxalement, l'étude des processus à long terme ne fait pas vraiment l'objet d'un affichage particulier au sein des actions thématiques SIC. Or, si les observations instrumentales sont essentielles à la compréhension des mécanismes, la Terre a connu au cours du Quaternaire des changements globaux rapides et d'amplitudes bien plus grandes que celles actuellement observées (Fig. 1), qui sont autant d'expériences naturelles pour mesurer la sensibilité du système Terre et tester les modèles prédictifs. Cette histoire géologique est en partie couverte par le domaine Terre solide, mais, en raison de la trop forte divergence des échelles temporelles, la continuité avec le registre instrumental SIC et l'articulation avec les enjeux SIC à court terme ne sont que trop rarement établis. Ce hiatus temporel majeur ne facilite pas l'émergence de travaux portant sur la dynamique aux échelles de temps intermédiaires

(100-1000ans), pour lesquelles l'importance respective des mécanismes et forçages à court et long-terme est encore mal établie. L'échelle séculaire apparaît pourtant essentielle dans la prédiction de la réponse au changement climatique.

La paléoclimatologie étudie depuis longtemps des enregistrements afin de comprendre les mécanismes à long terme et de placer dans une perspective historique les changements actuels. Ces enregistrements de la variabilité naturelle et anthropogénique sont souvent basés sur la réponse des SIC [e.g., flux sédimentaires (Fig. 1) et indicateurs fossiles des écosystèmes (Fig. 2)]. Les enjeux sont bien sûr de mieux caractériser les fluctuations climatiques et de quantifier la récurrence et l'amplitude des extrêmes météorologiques et hydrologiques pour éclairer notre analyse des extrêmes actuels, mais aussi pour comprendre leur impact. L'approche « multi-proxy » qui permet une étude intégrée de la réponse des différents compartiments du paysage à ces perturbations climatiques doit être privilégiée [érosion des



versants, réponse des sols, transferts dans les rivières et variations morphologiques, impact sur les ressources (eau, sols, biodiversité, alimentation), migration et adaptation des écosystèmes, impact sur les cycles biogéochimiques et rétroactions sur le système climatique], en identifiant à chaque fois les temps caractéristiques de réponse et les facteurs de résilience s'ils existent. Cet exercice doit être réalisé pour différents contextes climatiques (e.g., aride, tropical, périglaciaire...) et géomorphologiques (domaine côtier, montagne, plaines...), en ciblant les régions qui présentent un rôle clé dans le système étudié, sont d'une sensibilité élevée vis-à-vis du processus étudié (Fig. 1), sont sous-documentées et sont à fort enjeu socio-économique (Fig. 2 page suivante).

La reconstitution du passé implique des méthodologies spécifiques. Pour pouvoir prolonger le registre instrumental, ces méthodes doivent viser une quantification et une estimation des incertitudes. Pour cela la modélisation numérique, voire analogique, peut avoir un rôle important à jouer pour guider la lecture des archives. Le couplage des observations et de la modélisation, par exemple par des techniques de fusion modèles-données (calibration des modèles, assimilation des

données et inversion des modèles), est sans doute la voie d'avenir. Ces techniques, qui sont bien rôdées sur l'actuel, demandent cependant une adaptation particulière à cause de la rareté des données, de l'hétérogénéité de leur distribution spatio-temporelle et de l'incertitude associée aux mesures.

Deux types d'actions nous semblent essentiels à mener de concert pour répondre aux questions précédentes :

- la construction de bases de données intégrées, multi-temporelles et multi-proxies

Pour comprendre l'évolution des paysages en lien avec le changement global et les activités humaines, des recherches méthodologiques doivent être engagées pour reconstituer finement, dans l'espace et dans le temps, les évolutions passées résultant des interactions entre l'environnement et les sociétés, en portant une attention particulière sur les phénomènes rares (extrêmes) et sur l'imbrication des échelles. L'objectif est de reconstruire, pour une zone donnée et pour une grande gamme d'échelles de temps, la dynamique du paysage (topographie, sol, écosystèmes, sociétés), les forçages tectono-climatiques et les flux physicochimiques. Des approches couplant ces données hétérogènes doivent être explorées, tout comme de nouveaux proxies et méthodes de datation. Le choix des objets présentant le signal le plus riche et permettant d'agréger diverses communautés scientifiques (SIC, ST, OA, InEE, InSHS) est un enjeu à part entière.

- le développement de modèles numériques spatialisés des paysages, aux échelles de temps intermédiaires

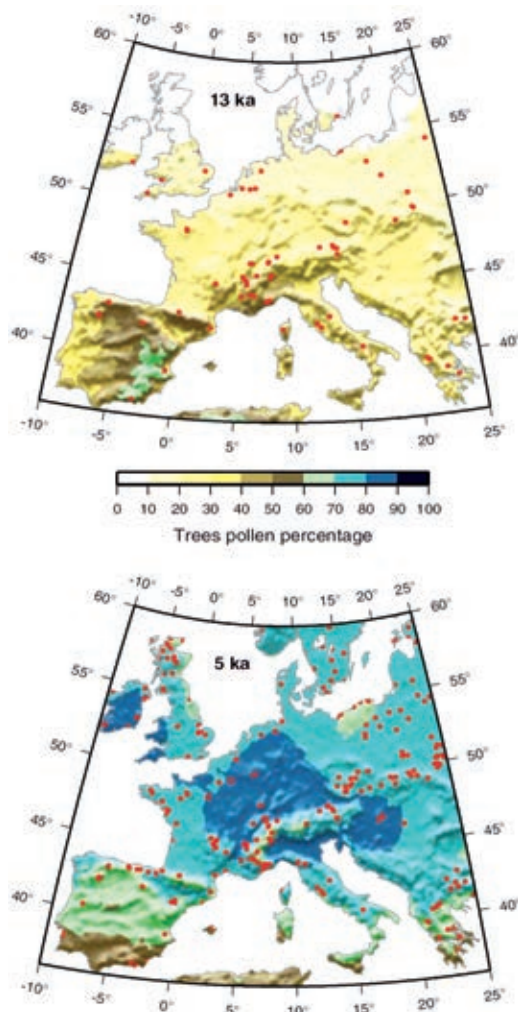
Des travaux sont actuellement menés sur le développement

Figure 1. Paysage de Nouvelle-Zélande (Rangitikei river) résultant de l'impact de forçages tectoniques, climatiques et anthropiques à différentes échelles de temps: surrection tectonique continue depuis 100 000 ans, fluctuations climatiques de - 100 000 ans à - 1 000 ans modulant la production et les transferts de matières dont témoignent de nombreuses terrasses fluviales, déforestation quasi complète depuis le Moyen Âge entraînant une augmentation de l'érosion des sols. L'impact de ces multiples forçages sur la dynamique actuelle et future des flux physicochimiques reste difficile à prédire. Ces contextes à fort signal permettent une très bonne quantification des forçages passés et de la réponse des SIC. © Géosciences Rennes, Dimitri Lague



Articulations temps courts/temps longs :
l'héritage et l'enseignement du passé pour mieux prédire le futur

Figure 2. Reconstruction de la couverture forestière, il y'a 13000 ans et 5000 ans, à partir des pourcentages de pollens contenus dans les enregistrements sédimentaires (Cheddadi et Bar-Hen, 2009). Ces données mettent en avant un fort gradient nord-sud dans la transformation des écosystèmes et fournissent des contraintes fortes sur les conditions paléoclimatiques. © Cheddadi and Bar-Hen, Climate Dynamics, 2009



de modèles numériques pour les temps longs (e.g., simulation de l'évolution des reliefs) et les temps courts (e.g., érosion des sols et transferts dans les réseaux hydrographiques), mais aucun n'est adapté à l'évaluation des conséquences du changement climatique durant le siècle à venir ou à l'étude de l'impact à moyen-terme des opérations de restauration environnementale telles que l'arasement des barrages fluviaux. Cette nouvelle génération de modèles devra être capable de coupler différents ingrédients élémentaires (hydrologie, érosion/transport, écosystèmes...), tout en prenant en compte des processus aux cinétiques longues (e.g., développement des sols, morphodynamique des rivières) et des forçages potentiellement rapides (e.g., extrêmes météorologiques, perturbations anthropiques). La création d'une plateforme numérique soutenue par le CNRS-INSU et le CNRS-InEE faciliterait l'émergence d'un modèle pluridisciplinaire unique et d'une communauté d'utilisateurs. L'augmentation de la complexité d'un tel modèle par rapport aux modèles existants sera nécessaire pour quantifier le rôle des ingrédients élémentaire (e.g., le vivant est-il critique à toutes les échelles de temps?), tout en offrant une plus grande gamme de proxies à utiliser pour comparer les modèles aux bases de données.

L'analyse précédente fait ressortir le besoin d'ouvrir le champ des SIC à des échelles de temps plus longues pour aborder la prédiction aux échelles de temps séculaire et mieux appréhender l'héritage des perturbations historiques et géologiques passées. La démarche la plus simple consisterait à élargir explicitement la gamme de temps couverte par les AT existantes afin de permettre d'aborder l'analyse et la modélisation des paysages, des forçages climato-tectoniques et des flux physicochimiques depuis le Quaternaire jusque l'Anthropocène.

Paysages urbains

Le paysage urbain doit être considéré comme une Surface ou interface continentale à part entière, dont la spécificité repose tout à la fois sur une forte anthropisation et sur la présence d'éléments naturels. Le thème des paysages urbains est abordé ici sous l'angle de la physique, car les processus physiques en forte interaction, dont les paysages urbains sont le siège, apparaissent comme structurants et intégrateurs dans la démarche de compréhension du système et de ses impacts et permettent de faire le lien entre les différents compartiments de la ville (sous-sol, surface, atmosphère). Des ouvertures vers d'autres champs disciplinaires tout aussi nécessaires à la compréhension de ce système complexe, dans lequel les comportements et usages jouent un rôle important, sont aussi proposées.

La ville concentre une forte densité de population, de biens et d'infrastructures, ainsi qu'une grande partie des activités économiques. Le développement urbain durable présente d'importants enjeux environnementaux et économiques locaux (gestion de l'occupation du sol, de l'eau, des pollutions et des nuisances) et globaux (climat, énergie ou biodiversité), et se doit de répondre à la demande sociétale en termes de qualité de vie, de mobilité ou de mixité sociale. Ces enjeux déjà forts vont se renforcer sous l'effet conjoint de l'accroissement de la population urbaine et du changement climatique.

Le milieu urbain est un système qui impacte les différents compartiments que sont l'atmosphère, la surface et le sous-sol, et la façon dont ils interagissent (Fig. 1) :

- la forte densité de surfaces imperméables influence les transferts d'eau et de polluants entre la surface et le sous-sol ;
- la présence de matériaux artificiels, associée à la morphologie 3D complexe du tissu urbain, conduit à des bilans d'énergie spécifiques et à des modifications du vent et des processus de dispersion ;
- le sous-sol fortement remanié induit des écoulements hydrologiques préférentiels ;
- les activités humaines génèrent des émissions directes de chaleur, d'humidité et de polluants spécifiquement urbains, dont les mécanismes de transfert au sein et entre les différents compartiments restent à préciser ;

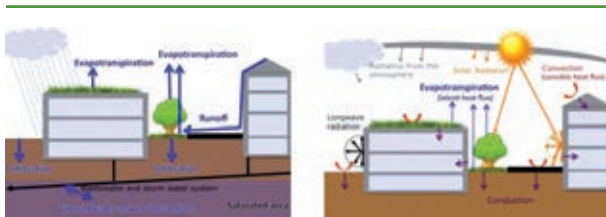


Figure 1. Processus physiques contribuant au microclimat urbain et à l'hydrologie urbaine: bilan hydrique et énergétique des surfaces. © Bozonnet et al., *Int. J. Low-Carbon Tech.*, 2013

- les habitants font partie intégrante du milieu urbain et, au travers des usages ou comportements, participent de façon non négligeable aux différentes problématiques environnementales liées à la ville.

Malgré ses particularités, le milieu urbain renvoie aux problématiques des SIC « classiques » puisqu'un grand nombre de processus physiques et chimiques y sont similaires. De plus, c'est un milieu très hétérogène dans lequel des éléments naturels tels que l'eau ou la végétation sont présents, faisant partie intégrante des stratégies d'adaptation de la ville aux divers changements (croissance de la population urbaine et changements climatique, modes de vie, demande énergétique, gestion des espaces, gestion des eaux pluviales...), en tant qu'éléments d'adaptation mais également en tant que systèmes impactés par les stratégies mises en œuvre. Ainsi, l'étude du milieu urbain trouve une place légitime dans les prospectives SIC (CNRS-INSU, CNRS-InEE) mais doit nécessairement s'appuyer sur l'expertise d'autres communautés scientifiques (CNRS-InSHS et CNRS-InSIS).

La compréhension du fonctionnement des différents compartiments du milieu urbain est actuellement abordée par le biais de l'observation et de la modélisation des processus physiques. Les aspects qu'il nous semble nécessaire d'approfondir concernent :

- le microclimat urbain, par le biais d'observations et de modélisations multi-échelles, pour comprendre ses causes et sa variabilité, entre les quartiers d'une ville et au sein d'un même quartier, et être en mesure de modéliser explicitement ou de façon paramétrique les processus sous-maille ;
- le fonctionnement de la végétation urbaine pour estimer ses bénéfices, en termes de régulateur thermique ou de dispositif alternatif à la gestion des eaux de pluie, la faisabilité d'un verdissement intensif de la ville en termes de ressources en eau et d'influence sur les nappes phréatiques... ;
- les sols urbains dont les fonctions sont à redéfinir et à préserver, car ils sont trop souvent considérés comme des « matériaux » géotechniques et de simples supports ; malgré leur pauvreté en

Paysages urbains

matière organique et en organismes vivants, il est important de les repositionner en tant qu'interface entre atmosphère et sous-sol, au sein des écosystèmes urbains, par rapport aux échanges de gaz (CO_2 , O_2 notamment), d'eau et de matière (nutriments, polluants et matière organique), tout en sachant qu'un effort de conceptualisation sera sans doute nécessaire pour simplifier le système vivant ; en outre, la fonction d'archive de la ville vis-à-vis des pollutions suscite un intérêt marqué auprès des paléo-environmentalistes ;

- l'hydrologie urbaine, de façon à en comprendre et modéliser le fonctionnement spécifique lié au caractère hétérogène du sous-sol et aux surfaces imperméabilisées ;
- la pollution urbaine relative aux différents compartiments air, eau et sols, en faisant un effort particulier sur le suivi des polluants par le biais de réseaux d'observation interdisciplinaires et sur la modélisation des transferts entre compartiments (Fig.2) ; le thème général de l'altération du milieu par les émissions anthropiques à l'intérieur du tissu urbain et de la protection du patrimoine bâti est aussi une entrée pertinente pour les SIC.

L'observation en milieu urbain, malgré son extrême complexité liée aux contraintes et à l'hétérogénéité propres au milieu et aux différents processus en interaction qu'il convient de « mesurer », est encore aujourd'hui nécessaire. Cependant, la constitution de bases de données sur la physique des processus doit être associée à des connaissances sur les pratiques des habitants. Elle

repose sur la mise en place d'observatoires ou sur la pérennisation et l'ouverture vers d'autres communautés des observatoires existants. Un gros effort doit aussi porter sur l'enrichissement et l'homogénéisation de la géo-connaissance urbaine (description du bâti et du sous-sol incluant les réseaux hydrologiques) des villes françaises, qui constituent à l'heure actuelle des verrous forts dans la mise en œuvre et l'évaluation des modèles.

L'étude du milieu urbain ouvre sur des champs de recherche interdisciplinaires liés de façon naturelle aux interactions entre différents processus physiques (hydrologie, micro-climatologie, thermique du bâtiment, qualité de l'air, acoustique). La compréhension du milieu urbain et l'analyse de ses impacts doivent être renforcées en s'appuyant sur la connaissance des pratiques et usages des habitants (pratique du « jardinier » dans l'utilisation des engrais ou désherbants, comportement des occupants des bâtiments...) et sur des analyses croisées entre approches physique et sensible (perception). Cette approche multidisciplinaire est cruciale lorsqu'il s'agit de proposer et d'évaluer différentes stratégies d'adaptation de la ville aux changements et de tester l'acceptabilité des scénarios proposés. L'objectif est de tendre vers une modélisation intégrée de la ville prenant en compte non seulement les interactions entre processus physiques (point sur lequel la communauté concentre actuellement ses efforts) mais aussi les aspects économiques et sociaux, l'écologie du paysage devant intervenir dans la définition et l'évaluation des stratégies de développement urbain. Dans le contexte actuel d'expansion urbaine en réponse à la pression démographique, les enjeux de recherche et d'action se concentrent sur les zones de transition situées aux interfaces ville/campagne, et particulièrement sur le péri-urbain, milieu complexe qui se caractérise par une très forte hétérogénéité du paysage.



Figure 2. Émissions et transferts de polluants en milieu urbain.
© Neil Stewart, Diamond and Hodge, *Env. Sci. & Technol.*, 2007

Littoral

En tant que zone majeure de contact entre le système «Terre» et le système «mer», l'espace côtier, et en particulier sa zone littorale, présente un ensemble de plusieurs interfaces (continent – océan, océan – atmosphère, eau – sédiment et côte – large) sur des surfaces et des volumes relativement modestes, ainsi que de forts gradients environnementaux naturels qui génèrent une grande «hétérogénéité» des systèmes à différentes échelles spatio-temporelles pouvant descendre à des échelles très fines (centimètre et seconde). Ces particularités lui valent de concentrer des questionnements scientifiques très variés, destinés à mieux comprendre la nature et la dynamique de son environnement : flux et forçages physiques, biologiques, géochimiques et leurs interactions et rétroactions ou encore impact des événements extrêmes (crues, tempêtes) et du changement global, pour n'en citer que quelques-uns. Littoral et zone côtière sont en outre soumis à des pressions anthropiques fortes et croissantes, liées à l'urbanisme (littoralisation), à l'aménagement du territoire (industrialisation et modifications de l'usage des sols) et à l'exploitation des ressources minérales et vivantes à terre (pollutions métalliques et organiques) ou en mer. Cette anthropisation est telle que l'espace côtier peut être considéré, dans sa quasi-totalité, comme anthropo-construit. Cette situation nécessite, ici plus qu'ailleurs peut-être, de porter une attention toute particulière sur la gestion des risques (risques écotoxicologiques, tempêtes, crues, submersion, érosion des côtes, transport maritime, perte de biodiversité, fragmentation de systèmes...). En soulevant ainsi des questions touchant à la dynamique des environnements, des écosystèmes et de la biodiversité, à l'ingénierie écologique et aux risques naturels et technologiques, le domaine côtier constitue un chantier de recherche pertinent pour bon nombre de disciplines et de communautés.

«... L'espace côtier, lieu de rencontres d'activités traditionnelles, d'usages nouveaux et de pressions anthropiques constituant des menaces pour les écosystèmes, est au cœur de politiques publiques qui s'élaborent au niveau national, européen et international en s'appuyant largement sur les résultats de la recherche.» (Programme Mer AllEnvi, 2012). La communauté SIC du CNRS-INSU apporte sa contribution à ce corpus de résultats. Les recherches développées abordent des sujets aussi diversifiés que le fonctionnement des écosystèmes, les grands cycles biogéochimiques, les flux de matières et d'énergie ou la dynamique des contaminants. Toujours d'actualité en raison de l'ampleur de la tâche, les grandes voies de recherche exprimées voici quelques années en termes de priorité sont également déclinées, en fonction de leurs domaines de compétences respectifs, par d'autres acteurs (domaine OA et TS du CNRS-

INSU, CNRS-InEE, universités, autres organismes). De ce fait, les réflexions prospectives menées récemment, à l'occasion de diverses rencontres, ont tout autant porté sur les principaux sujets que la communauté souhaiterait approfondir ou aborder dans les principaux champs disciplinaires concernés, que sur des questions stratégiques touchant à sa structuration (communauté des «physiciens et morphodynamiciens», par exemple), aux besoins en termes de développement de l'instrumentation et des infrastructures ou aux mesures à prendre afin de favoriser les approches pluridisciplinaires.

■ Hydro-morphodynamique du littoral

Le littoral, caractérisé par une grande diversité d'environnements (plages sableuses ou rocheuses, cordons dunaires, falaises, lagunes, estuaires...) est une zone très mobile et évolutive du fait de forçages hydrodynamiques et météorologiques souvent intenses. Cet environnement est fragile, car soumis à l'impact d'activités humaines qui ne cessent d'augmenter (urbanisation, aménagements...), mais aussi aux effets du changement climatique (élévation du niveau de la mer, modification du régime de houles, inondations). Comprendre le fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire des environnements littoraux est crucial pour prédire leur évolution et celle des écosystèmes associés.

La prospective en hydro-morphodynamique du littoral s'est déroulée en plusieurs étapes. Lors des journées annuelles RESOMAR en octobre 2012, s'est tenu un atelier «physique du littoral» regroupant une quinzaine de participants qui a permis de recenser les grandes questions scientifiques et d'identifier les acteurs clés, en vue d'un atelier spécifique qui s'est tenu sur deux jours en mai 2013. Cofinancé par RESOMAR et le CNRS-INSU, ce nouvel atelier a impliqué trente laboratoires du CNRS (INSU, InEE, InSIS et IN2P3). Il avait pour objectif :

- d'affiner les problématiques scientifiques et d'identifier d'une part les verrous dans les connaissances en hydrodynamique, transport sédimentaire et morphodynamique littorale, et d'autre part l'instrumentation et les méthodologies novatrices permettant de les lever ;
- de définir les contours d'un Service national d'observation (SNO) afin de pérenniser les moyens d'observation en zone littorale.

Plus généralement, l'ambition était de structurer la communauté hydro-morphologique du littoral et d'établir un plan d'actions. Les

travaux se sont nourris de la réflexion « littorale » menée dans le cadre de la prospective CNRS-INSU Océan de 2011 (http://www.insu.cnrs.fr/files/draft_prospectiveslittoral_version2.pdf). Les conclusions de ces ateliers ont ensuite été rapportées lors des journées prospectives SIC du CNRS-INSU en Juin 2013. Enfin, dans le cadre des journées RESOMAR de novembre 2013, cette prospective a été confrontée à une communauté « littoral » plus large.

Les questions prioritaires et verrous majeurs en hydro-morphodynamiques littorales qui ont émergé de ces ateliers pour les différents thèmes sont :

- en hydrodynamique littorale, l'enjeu est la compréhension des processus de couplage entre zone littorale et zone côtière, de la dynamique des zones très peu profondes (zone de déferlement) et du comportement des masses d'eau à l'embouchure des rivières et des lagons ;
- en transfert sédimentaire, les enjeux sont une meilleure caractérisation des flux verticaux (typiquement l'érosion et le dépôt de sédiments en suspension à travers l'interface eau – sédiments), le transfert d'échelle depuis les processus instantanés jusqu'aux bilans globaux de matières et les interactions physiques entre les sédiments en suspension et le « biologique », soit dans la colonne d'eau (contribution à la floculation des particules en suspension), soit dans la couche limite benthique (par exemple, effet des herbiers et de la faune sur les flux de dépôt et sur l'érodabilité des sédiments déposés) ;
- en morphodynamique, l'objectif est l'amélioration de notre connaissance des couplages vagues – circulation – transport sédimentaire, du lien entre les différentes échelles spatiales (rides, dunes, bancs, baies, estuaires), de l'intégration des enregistrements passés pour la compréhension du présent et de la résilience des systèmes ;
- en méthodologies novatrices, et pour les différents thèmes, plusieurs paramètres clés [vitesses de courant (frottement) à proximité du fond, flux de sable transportés par charriage, caractéristiques des mélanges de matériaux hétérogènes, turbulence dans les fortes concentrations en sédiments...] sont toujours difficilement accessibles par la mesure *in situ* ; ils nécessitent des développements instrumentaux et méthodologiques, notamment des développements multi-capteurs couplant des méthodes acoustiques et optiques actives et passives sur différents types de plateformes (aérienne, marine, sous-marine, etc.) ; par ailleurs, des modèles morphodynamiques littoraux étant capables dès à présent d'intégrer l'assimilation de données bathymétriques pour les rendre prédictibles, le développement de méthodes spécifiques d'assimilation de données doit être poursuivi, aussi bien pour des données *in situ* que pour celles issues de la télédétection spatiale ou aéroportée.

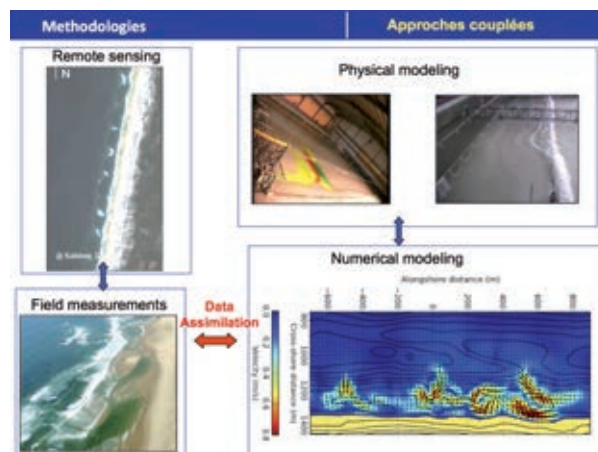


Figure 1. Approches méthodologiques en hydro-morphodynamique littorale.

La progression dans la compréhension des processus hydro-morphosédimentaires nécessite d'appliquer une méthodologie intégrée et pluri-compétences (Fig. 1). Cette méthodologie devra donc s'appuyer sur des plateformes et services nationaux qui seront à consolider ou à développer. La communauté attend notamment de ces services des données de datation de séries sédimentaires récentes, la capacité à développer des systèmes de mesures topobathymétriques et plus généralement la capacité d'expérimenter en conditions contrôlées les instruments de mesure « à la mer ».

Il est très important de poursuivre la structuration des apports de cette communauté hydro-morphodynamique, en très forte synergie avec ceux des autres dimensions, notamment la dimension biologique, des études littorales. La communauté propose d'identifier clairement des priorités autour de la dynamique physique du littoral, qui soient partagées par ou communes aux appels d'offre LEFE, EC2CO et SYSTER, où les questions décrites plus haut pourront être abordées dans le cadre de projets regroupant la communauté scientifique travaillant sur la discipline. Ce point peut être un des éléments majeurs favorisant les avancées sur la physique littorale.

■ Biogéochimie littorale et côtière

Le domaine littoral et côtier, riche en habitats contrastés (fleuves et estuaires, plages et dunes, falaises, milieux intertidaux et vasières, lagons et lagunes, récifs et mangroves...) est le siège de processus très diversifiés dans leur intensité et leur variabilité. Ce réacteur biogéochimique complexe, souvent fortement conditionné par le caractère très transitoire des forçages physiques, suscite dans notre communauté un grand nombre de recherches portant sur les compartiments tant abiotiques que biotiques. Les thèmes les plus abondamment discutés (liste non exhaustive) sont présentés ci-dessous.

• Caractérisation de la matière organique

Il s'agit ici de la caractérisation de la matière organique (MO) en termes de composition chimique, d'origine (autochtone/allochtone), de quantification des apports et de devenir (disponibilité et dégradabilité, transfert au large, diagénèse).

Ces questions doivent en particulier être abordées en termes de pertinence des échelles d'observation et d'expérimentation (de la micro-hétérogénéité spatiale à la méso-échelle et de la haute fréquence à des temps longs, décennaux à séculaires) au regard de la variabilité spatiale et temporelle des processus de production, de transformation, de transfert et de stockage plus ou moins définitif dans les sédiments. Des quantifications aussi précises que possible sont indispensables à l'établissement de bilans de la contribution du domaine côtier aux grands cycles biogéochimiques. La nécessité de mieux connaître et décrire la diversité microbienne impliquée dans les diverses phases de dégradation de la MO (couplage biologie – géochimie), de mettre en œuvre des outils moléculaires ou encore de résoudre des problèmes d'échelle (micro-échelle) a par ailleurs été évoquée.

• Quantification des flux de matière à l'interface continent – océan et leur transfert partiel vers le large (problématique partagée avec la communauté OA).

Il s'agit en particulier :

- de mieux connaître (quantifier), outre les apports de MO évoqués précédemment, les apports dissous et solides fournis par les fleuves (et dans une moindre mesure les dépôts atmosphériques) en rapport avec le fonctionnement des bassins versants ;
- de mieux comprendre les processus spécifiques à la zone littorale (interface en tant qu'objet d'étude en soi), d'estimer leur contribution aux grands cycles biogéochimiques (C, N, P, Si . . .) et de mieux étudier les forçages de toute nature qui les modulent.

Une faiblesse évidente a été relevée concernant la contribution des eaux interstitielles et des résurgences sous-marines, compartiments « délaissés » ou « oubliés » par notre communauté en raison des difficultés de leur étude (verrou technologique). A également été mentionnée la nécessité d'améliorer la connaissance des cycles biogéochimiques des ETIs (Éléments traces et isotopes), traceurs largement utilisés en milieu hauturier, mais dont l'utilisation pourrait sans conteste bénéficier d'une meilleure connaissance de leurs apports et comportements à l'interface continent – océan.

• Quantification des apports et devenir des contaminants

Cet aspect est un point particulier de la problématique précédente des apports. Outre la question de la quantification des apports de contaminants de tous ordres (organiques et inorganiques, « classiques » ou émergents) au domaine côtier et de leur éventuel transfert vers le domaine hauturier et profond, se posent également les questions de la biodisponibilité des contaminants et de leur impact sur le fonctionnement des systèmes. Il a été relevé que notre communauté n'était pas, pour l'instant, très active dans sa capacité de proposer des stratégies ou des méthodes dans le domaine de la restauration écologique des milieux impactés.

• Identification et formalisation des relations cause/effet en réponse aux perturbations à l'échelle des populations, des processus ou des systèmes

Les perturbations prises en compte sont de différents ordres (crises environnementales, évolutions lentes) et liées à différentes sortes de pressions (anthropique, climatique, environnementale) ou de transferts (bassin versant/littoral, littoral/large). Il s'agit, en particulier, de comprendre la manière dont les systèmes littoraux et côtiers évoluent et sont capables de faire face aux changements globaux (réchauffement climatique, pollutions, fractionnement des habitats, migrations lessepsiennes, invasions . . .). Une attention particulière devrait être portée par la communauté sur les écosystèmes fragiles (récifs coralliens, mangroves, herbiers).

• Développement d'indicateurs de la qualité écologique des milieux littoraux et côtiers

La mise en œuvre de la directive cadre Stratégie pour le milieu marin (DCSMM) requiert l'établissement d'un état initial des milieux et la définition de descripteurs des milieux et de leur état, dans une démarche éco-systémique, afin de pouvoir suivre les évolutions ultérieures. Outre un intérêt sociétal évident, l'implication de notre communauté dans les travaux de la DCSMM ouvre des perspectives de recherche très intéressantes car elles nous incitent à une véritable démarche éco-systémique au sein de laquelle les conditions physicochimiques des habitats sont indissociables de la notion de biodiversité et d'autres paramètres strictement biologiques.

• Modélisation du fonctionnement du système littoral et côtier

La modélisation est utilisée dans de nombreuses recherches comme un moyen de coupler des processus et de simuler la dynamique des systèmes complexes. Si un certain nombre de processus ont déjà été formalisés, il reste à développer des méthodes de résolution adaptées aux contraintes liées à la dynamique et la réactivité de l'espace côtier. Il s'agira également d'aborder les problèmes de transfert d'échelle propres au littoral. La confrontation des récents développements en modélisation devrait permettre de proposer des méthodes de formalisation des changements d'échelle liés aux différents types d'hétérogénéité et de variabilités spatiales et temporelles ainsi qu'aux interfaces entre systèmes environnementaux et sociaux. Cette approche numérique pourrait tirer utilement bénéfice d'un échange de méthodes mises en œuvre dans différents champs disciplinaires (systèmes sociaux, écologie terrestre, etc.).

• Instrumentation, infrastructures et chantiers démonstrateurs

Au cours des dernières années, de nombreux développements ont été opérés dans le domaine de l'instrumentation (e.g., LIDAR et radars), dont certains ont fait l'objet de projets spécifiques (e.g., JERICO pour les compartiments et les processus biologiques et GROOM pour les gliders, Fig.2). Une priorité immédiate dans ce domaine consiste à optimiser ces équipements, à s'assurer de leur opérabilité à faible profondeur et à les doter de capteurs propres à la communauté.

Parallèlement, de nouveaux développements doivent clairement être poursuivis, notamment dans deux domaines présentant encore un retard en la matière :

- la biologie, avec les domaines privilégiés que constituent l'imagerie, l'acoustique, les approches moléculaires ainsi que la transposition in situ de techniques de laboratoire (e.g., cytométrie) ;
- la spatialisation de l'acquisition des données avec trois enjeux majeurs autour de la télédétection (amélioration des algorithmes), des gliders (miniaturisation) et de l'automatisation de l'instrumentation embarquée à bord de navires d'opportunité.

Dans tous les cas, l'expérience montre que la communauté scientifique a tout intérêt à interagir avec des domaines éloignés tels que ceux de l'ingénierie. La modernisation du parc instrumental doit nécessairement s'accompagner d'une évolution significative des infrastructures consacrées à l'étude des milieux littoraux (accès au milieu, observation, expérimentation). Il est en particulier indispensable que ces infrastructures prennent en compte certaines des spécificités du milieu littoral (haute variabilité spatiale et temporelle des systèmes littoraux, forte interaction avec les systèmes adjacents, forte pression anthropique). Ceci nécessite notamment :

- le maintien d'un accès permanent et souple aux milieux, par le biais de la flotte côtière et de stations maintenant intégrée à l'UMS et au TGIR FOF (Flotte océanique française) ;

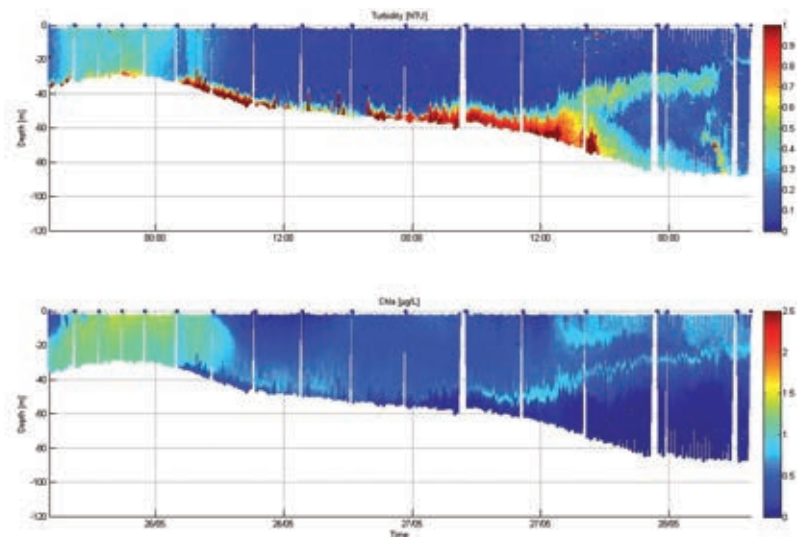


Figure 2. Radiale réalisée par glider (à droite, © CNRS Photothèque, John Pusceddu) dans les eaux côtières du golfe du Lion (Méditerranée NO) en mai 2013 montrant des structures turbides particulières à petite échelle, notamment à proximité du fond marin (turbidité optique en NTU en haut et chlorophylle A en bas). Données non publiées François Bourrin (Programme EC2CO TUCPA), CEFREM

- la création d'une infrastructure d'observation spécifiquement dédiée aux apports continentaux ainsi qu'à leurs impacts sur la structure et le fonctionnement des systèmes littoraux ;
- la création d'un Service national d'observation (SNO) CNRS-INSU «Trait de côte», qui sera le levier permettant d'assurer une pérennité à l'effort incitatif impulsé par le SOERE éponyme, tout en intégrant les autres environnements littoraux que sont les falaises et les estuaires et en s'ouvrant de façon raisonnée aux littoraux des DOM ; le SOERE actuel pourra alors évoluer vers un périmètre institutionnel élargi (MEDDE, autres EPST et EPIC, collectivités) et une contribution plus forte aux missions de surveillance ;
- la prise en compte des niveaux d'hétérogénéité à petites échelles spatiales (cf., la spatialisation évoquée plus haut) et temporelle (thématique haute fréquence) ;
- ces évolutions vont engendrer une plus grande complexité dans les protocoles d'acquisition et de traitement des données ; dans ce contexte, une recommandation forte consiste en ce que la communauté mutualise ses compétences afin d'optimiser et homogénéiser les procédures, de l'acquisition des données à leur traitement et stockage dans un petit nombre de bases de données dédiées et dont les architectures devront être coordonnées ; au demeurant, l'hétérogénéité des habitats et la complexité des processus intervenant en milieu littoral sont telles que l'association observation/modélisation s'avèrera très probablement insuffisante à une compréhension satisfaisante, laquelle nécessitera donc la mise en œuvre d'approches expérimentales d'envergure ; or les infrastructures expérimentales étant actuellement largement obsolètes, leur modernisation et leur coordination en lien avec l'approche comparative mentionnée ci-dessus vont s'avérer indispensables.

Enfin, un enjeu majeur pour ces prochaines années consiste à identifier une série de systèmes modèles contrastés (points focaux), susceptibles de faire successivement l'objet d'études mobilisant une partie significative de la communauté autour de questions scientifiques explicitement pluridisciplinaires. Ces points focaux devront être étroitement adossés aux infrastructures d'observation et d'expérimentation. Une question transversale qui pourrait y être abordée dans le cadre de la directive cadre Stratégie pour le milieu marin réside dans le développement d'une vision croisée de la qualité écologique des systèmes littoraux.

■ Relations avec les systèmes adjacents

Les écosystèmes littoraux présentent une continuité évidente avec leurs homologues continentaux et côtiers, si bien que des questions scientifiques telles que l'étude des effets des apports continentaux sur la structuration et le fonctionnement des écosystèmes littoraux (voir également ci-dessus) ou bien l'analyse de la connectivité des habitats et des populations continentales côtières et littorales ne sauraient être abordées à partir de la simple superposition d'études indépendantes conduites dans chacun de ces environnements. La structuration actuelle de certains programmes nationaux (e.g., LEFE et EC2CO) favorise pourtant, de fait, une telle disjonction. Il est donc urgent de remédier à cette situation en développant des liens forts entre les programmes concernés. Cela permettrait notamment d'aborder de manière coordonnée des questions scientifiques relatives aux flux de matière et d'organismes dans et au travers des systèmes littoraux et d'approfondir une seule et même question scientifique (e.g., la relation biodiversité – fonction) à partir d'études complémentaires tirant partie des caractéristiques spécifiques de systèmes littoraux et côtiers.



Conclusion

Conclusion

La prospective qui s'achève aura été l'occasion de souligner, si cela s'avérait encore nécessaire, la profonde synergie que les communautés centrées sur les surfaces et interfaces continentales entretiennent entre leurs recherches fondamentales et les grandes questions sociétales.

Nos communautés sont reconnues et s'appuient sur des outils performants dont la mise en réseau, à travers notamment les services d'observation et les grands instruments, a déjà permis et permettra des progrès importants dans la caractérisation des milieux et la compréhension des mécanismes bio-physico-chimiques à l'œuvre à la surface de la Terre. L'acquisition de données de qualité (et permettant de documenter des mécanismes précis) reste donc un élément déterminant, notamment pour la modélisation des systèmes complexes, ceci à toutes les échelles d'espace et au-delà des spécificités disciplinaires. Les ponts entre les échelles allant de l'atome aux paysages doivent être renforcés, notamment par la généralisation de l'utilisation des outils de l'imagerie incluant la géophysique de sub-surface et la télédétection. La mesure, l'observation et la compréhension des mécanismes doivent permettre de développer des modèles de fonctionnement des surfaces et interfaces terrestres plus réalistes que ceux utilisés actuellement pour simuler les scénarios d'évolution géologique ou anthropique. Au couplage des échelles d'espace doit s'ajouter une analyse critique de l'historicité des objets étudiés, afin de pouvoir faire le lien avec l'évolution du système Terre aux échelles de temps géologiques et ainsi mieux appréhender les changements de la période actuelle encore dénommée Anthropocène.

Les programmes ont démontré leur pouvoir structurant et doivent être maintenus pour permettre de consolider des approches intégratives et systémiques essentielles à la compréhension des systèmes complexes que sont les milieux terrestres, estuariens et côtiers. Ces programmes sont aussi un outil fondamental de transdisciplinarité.

Plus que jamais, la pluridisciplinarité est constitutive de nos approches. Elle est naturelle dans le « continuum » des sciences physique, chimique et biologique en lien avec l'étude du système Terre, mais elle doit s'étendre aux sciences plus globales de la société et être encore mieux affirmée et revendiquée, afin de renforcer les compétences disciplinaires des chercheurs. Il sera alors possible d'aborder avec confiance des sujets aujourd'hui qualifiés de complexes, notamment l'étude des couplages entre le vivant et le milieu physique et tout particulièrement les actions et rétroactions du vivant sur les processus physicochimiques qui structurent les différents environnements des SIC. Dès lors, le concept de zone critique, utilisé pour désigner la pellicule hétérogène sur laquelle l'humanité vit et dont elle se nourrit,

ainsi que ses diverses frontières (couche limite atmosphérique, zones côtières...) apparaissent comme un paradigme original et fédérateur.

Parce qu'elle se construit sur des questions scientifiques majeures avec des compétences démontrées, qu'elle se structure via ses instruments et ses programmes et qu'elle reçoit l'appui de ses partenaires au CNRS et au-delà, la communauté SIC peut sereinement revendiquer une place majeure dans le paysage de l'enseignement supérieur et de la recherche. Elle doit néanmoins poursuivre son intégration internationale et notamment européenne, déjà partiellement acquise mais qui doit être renforcée par une politique des acteurs institutionnels français qui soit concertée et s'appuie sur les communautés scientifiques.

Observer, comprendre, modéliser, simuler et tester les hypothèses pour répondre à des questions scientifiques majeures et à fort impact sociétal, tel est l'enjeu dont la communauté SIC souhaite se saisir pour contribuer, avec ses partenaires, à mieux comprendre le monde dans lequel nous vivons. À son entrée dans l'Anthropocène, l'humanité n'a d'autre choix que de comprendre pour mieux anticiper et gérer la planète.

A series of horizontal dashed lines for writing, spanning the width of the page.

A series of horizontal dashed lines for writing, spanning the width of the page.

Coordination éditoriale

Dominique Armand

Impression

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

Conception

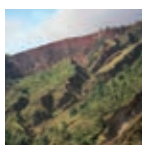
Trait de caractère(s)

Maquette

Page B

Juillet 2014

■ Légendes de la mosaïque de couverture



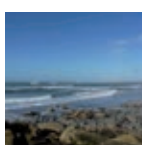
Lavaka, région du lac Alaotra à Madagascar, où des glissements de terrain déclenchés par des microséismes ont favorisé la formation de ravines. © IEES, Christian Valentin



Satellite Grace « Gravity Recovery and climate experiment », permettant notamment d'imager par gravimétrie les variations des stocks d'eau des hydro-systèmes souterrains.



Spectromètre à cristaux analyseurs de la ligne de lumière CRG Fame (ESRF, Grenoble). Le faisceau de rayons X illuminant l'échantillon (flèche bleue) est ré-émis par l'échantillon vers les cristaux analyseurs puis vers le détecteur (faisceaux rouges). © ESRF



Plage Le Guerou, à Lampaul-Plouarzel dans le Finistère. Cet estran est assujéti à une hydrodynamique particulièrement intense. © « Domaines Océaniques », France Floc'h, UBO



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>