



# PROSPECTIVE

SURFACES ET INTERFACES  
CONTINENTALES 2018-2022

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS



# **Bilan et Prospective 2018-2022 de la Commission Spécialisée Surfaces et Interfaces Continentales de l'Institut National des Sciences de l'Univers**

**SYNTHÈSE DES ATELIERS, DES FORUMS PRÉPARATOIRES  
ET DU COLLOQUE DE PARIS 9 - 11 OCTOBRE 2017**

Sous la coordination de Jean-Luc Probst, Président de la CSSIC, Fatima Laggoun, Directrice Adjointe Scientifique du domaine SIC - INSU

## SOMMAIRE

<b>Édito</b>	<b>7</b>
<b>Introduction : Une prospective des sciences des Surfaces et Interfaces Continentales dans l'agenda post COP 21</b>	<b>9</b>
<b>Que reste-t-il de la prospective 2013-2017 ?</b>	<b>13</b>
Des thématiques pleinement traitées, mais des interfaces en devenir	
Des défis aux interfaces	
Des services d'observation mieux structurés	
Asseoir et diffuser notre expertise sur l'expérimentation tout en suscitant une plus forte dynamique de modélisation	
EC2CO, une action incitative structurante	
<b>Comment innover aussi dans la communication de notre objet d'étude ?</b>	<b>21</b>
Contexte scientifique, technique et sociétal, les enjeux	
État de l'art et verrous scientifiques et techniques	
Priorités pour les années à venir	
Relations avec les Objectifs de Développement Durable (ODD)	
Conclusion	
<b>De l'observation à la modélisation : approches intégrées</b>	<b>29</b>
Approche intégrée: observations/expérimentations <i>in situ</i> , télédétection, modélisation	
Stratégie d'Observation à Long Terme	
Modélisation	
<b>Cycles longs – Cycles courts</b>	<b>53</b>
Contexte scientifique, technique et sociétal, les enjeux	
État de l'art et verrous scientifiques et techniques	
Priorités pour les années à venir	
Implications	
<b>Liens biotique – abiotique</b>	<b>61</b>
Contexte scientifique, technique et sociétal, les enjeux	
Le vivant et le climat : actions et rétroactions	
Le vivant dans les cycles biogéochimiques des surfaces continentales	
Cycle des contaminants et interactions avec le vivant	
Implications	
Relation avec les Objectifs de Développement Durable (ODD)	
<b>La matière organique dans tous ses états</b>	<b>73</b>
Contexte scientifique et enjeux	
Panorama de la communauté scientifique française travaillant sur les MO	
Axes de recherche identifiés pour chacun des champs de recherche choisis	
Forces, faiblesses, opportunités et menaces pour la communauté scientifique française	
Pistes d'action et de recherches futures	
Quelles structures, quelles formations et quels moyens pour l'avenir...	

---

<b>Interface entre la basse atmosphère et les surfaces continentales</b>	<b>83</b>
Préambule	
Contexte et enjeux scientifiques	
État de l'art et verrous scientifiques	
Priorités scientifiques pour les années à venir	
Verrous techniques	
Implications	
Objectifs de développement durable et relations avec les porteurs d'enjeux	
<hr/>	
<b>Le continuum Homme-Terre-Mer</b>	<b>91</b>
Contexte scientifique, technique et sociétal, les enjeux	
État de l'art et verrous scientifiques et techniques	
Priorités pour les années à venir	
Implications pour la recherche	
Relation avec les Objectifs de Développement Durable (ODD)	
Relations avec les porteurs d'enjeux : décideurs publics, collectivités, grand public...	
Conclusion	
<hr/>	
<b>Nouvelles méthodes et nouvelles techniques de développement instrumentales</b>	<b>103</b>
Introduction	
Les priorités identifiées	
Besoins et challenges analytiques : analyses isotopiques et approches moléculaires	
Lien avec les Objectifs du Développement Durable (vision Post-COP 21)	
<hr/>	
<b>Événements Extrêmes - Aléas et Risques</b>	<b>111</b>
Contexte scientifique, technique et sociétal, les enjeux	
État de l'art et verrous scientifiques et techniques	
Priorité pour les années à venir	
Implications pour les moyens en équipement, les chantiers et moyens d'observations, les outils programmatiques, et les besoins de compétence	
Relation avec les ODDs	
Relations avec les porteurs d'enjeux	
<hr/>	
<b>Ont contribué</b>	<b>116</b>
Animateurs d'ateliers et rédacteurs des chapitres	
Contributeurs aux textes et participants au colloque de prospective	
<hr/>	
<b>Annexes</b>	<b>118</b>
Références	
Glossaire	

---

Signataires:

**CNRS-INSU**

**CNRS-INEE**

**IRD**

**INRA**

**IRSTEA**

**IFREMER**

**BRGM**

**CNES**

**CEA**

**ANDRA**

**IFSTTAR**

**MÉTÉO-FRANCE**



# ÉDITO

Le changement global, dans ses dimensions climatiques et anthropiques est maintenant une réalité indiscutable. Ses impacts sont déjà ressentis par les sociétés humaines, y compris par une partie de nos concitoyens. Après avoir œuvré à la démonstration scientifique de ce basculement, les scientifiques doivent à présent s'atteler à en comprendre les impacts, et à identifier les solutions pour limiter ou réduire ses effets, notamment à l'échelle des territoires où ils sont les plus directement sensibles.

Ce document de prospective s'inscrit directement dans l'effort d'analyse des défis scientifiques et sociétaux à relever, en lien avec les engagements pris par les états dans le cadre de l'Accord de Paris (COP21, Décembre 2015) et avec les Objectifs du Développement Durable (ONU, 2015). Acquérir une compréhension en profondeur des mécanismes qui pilotent ces évolutions d'une portée sans précédent depuis la fin de la dernière glaciation est au cœur des questions des communautés scientifiques qui travaillent sur les surfaces continentales et à l'interface avec le milieu marin, en leur confiant une responsabilité particulière en amplifiant leur implication et leur synergie. Elles ont un rôle fondamental dans la production de connaissances objectives en appui à l'élaboration d'une action publique soucieuse de la gestion et du devenir des ressources naturelles (eaux, sols, biodiversité ...), et confrontée

à des équilibres difficiles à trouver entre limitation, atténuation, remédiation et adaptation – ces quatre gradations des politiques environnementales concernant aussi bien l'empreinte humaine que ses effets.

Les sociétés humaines sont actrices des changements profonds qui affectent notre planète. Elles en sont aussi victimes. Les scientifiques ont un devoir de recherche et de partage, en faisant savoir qu'ils se saisissent de ces enjeux globaux. Pour cela, il importe de replacer les sciences au cœur de la cité, que ce soit à travers la formation, l'information ou la communication, mais aussi en menant une réflexion sur l'attrait et l'apport des sciences participatives.

Ce document de prospective fait suite à la réflexion de la communauté SIC et au colloque qui s'est tenu du 9 au 11 octobre 2017 et qui fut l'occasion, après plus d'un an de préparation au sein des laboratoires, de confronter et synthétiser les priorités de la communauté scientifique, mais aussi d'impliquer la société dans nos démarches via un forum de rencontres entre société civile et scientifiques. Il fut aussi le produit d'une forte synergie de cette communauté avec les organismes et établissements partenaires de l'enseignement supérieur et de la recherche qui se sont associés à cet effort scientifique et qui en partagent les conclusions et les engagements.



Source: pexels.com © Dom J.



# INTRODUCTION

## UNE PROSPECTIVE DES SCIENCES DES SURFACES ET INTERFACES CONTINENTALES DANS L'AGENDA POST COP 21

### LA SCIENCE EN SIC : UNE APPROCHE NÉCESSAIREMENT TRANSDISCIPLINAIRE ET SYSTÉMIQUE

Le système Terre traverse une période de transition rapide qui affecte aussi bien les milieux physiques que les milieux vivants. Cette transition est caractérisée au premier chef par une intensification de la dynamique des différentes composantes du système: un climat plus extrême au sens développé par Giorgi *et al.* (2012), une intensification du cycle hydrologique, une pression des sociétés humaines plus forte sur tous les milieux, qu'ils soient faiblement ou fortement anthropisés, la multiplication des pollutions « émergentes », une utilisation irréversible de certaines ressources, une urbanisation et littoralisation croissantes, une disparition accélérée des espèces végétales et animales, l'accroissement des inégalités entre et à l'intérieur des sociétés, une accélération des échanges et différentes formes de communication... Les scientifiques, qui s'intéressent à la dynamique des surfaces continentales et de leurs interfaces avec les autres grandes composantes du système Terre (les Océans, l'Atmosphère, la Terre interne, la Biosphère), sont au cœur de ces changements globaux et rapides, qui font émerger de nouveaux défis de connaissance tout en questionnant notre lien avec la société. L'apparition de la notion de « zone critique », au sein de laquelle se développe l'essentiel de la vie terrestre symbolise à elle seule ces évolutions de nos champs disciplinaires.

Le changement global active de nouvelles plages de fonctionnement du Système Terre, pour lesquelles nous faisons face à un déficit de connaissance qui concerne chaque processus pris isolément mais qui est encore plus criant concernant les interactions entre ces processus. On dispose de trop peu d'observation de cette dérive environnementale tout en ignorant si les lois développées pour un monde moins extrême s'appliquent à l'identique. Il s'agit donc pour les communautés scientifiques d'être en capacité de déterminer les trajectoires actuelles, possibles, probables des milieux et d'identifier les points de bascule ou de rupture vers lesquels elles peuvent mener. Ces trajectoires en question sont aussi bien celles des sociétés que celles des milieux dans lesquels elles sont ancrées. Les sujets de recherche qui découlent de ces constats font l'objet des différents chapitres de ce rapport de prospective.

Au-delà de chaque processus, leur couplage dans une approche globale est indispensable à l'identification des

trajectoires. Cette approche systémique impose des démarches interdisciplinaires, dont la nécessité est justement mise en avant par toutes nos institutions de recherche, organismes et universités. Les initiatives en ce sens sont nombreuses, mais autant les recherches associant différentes disciplines des sciences physiques et du vivant ont désormais une longue histoire de réussites derrière elles, autant l'interdisciplinarité entre sciences de l'environnement et sciences sociales se heurte encore à de nombreuses difficultés épistémologiques, culturelles et institutionnelles. Ce champ de réflexion, s'il est abordé à plusieurs moments des chapitres suivants ne pouvait être traité en tant que tel dans cette prospective car cela nécessite d'associer étroitement les différentes communautés concernées.

### LE DÉVELOPPEMENT DURABLE AU CŒUR DU LIEN NÉCESSAIRE ENTRE SCIENCE ET SOCIÉTÉ ET VECTEUR DE NOUVELLES QUESTIONS SCIENTIFIQUES DE L'ANTHROPOCÈNE

Parallèlement à cette question de l'interdisciplinarité se pose celle du lien entre Science et Politique. La démarche scientifique n'a jamais été un processus intellectuellement pur se déroulant dans un univers où les enjeux socio-économiques n'auraient pas leur place. Mais l'entrée dans l'Anthropocène et la situation inédite dans laquelle nous nous trouvons de mettre en péril notre propre survie par la pression que nous exerçons sur la planète imposent aux scientifiques de mieux communiquer avec tous les acteurs de la Société pour alerter sur les effets que les changements globaux font peser sur la stabilité et le devenir des sociétés humaines. Une nouvelle dynamique d'échanges Science-Politique s'est mise en place lors du sommet de la Terre de Rio en 1992, qui a notamment débouché sur la signature des trois grandes conventions cadre « environnementales » des Nations Unis, à savoir celle sur le changement climatique (CCNUCC), celle sur la lutte contre la désertification (CNULCD) et celle sur la diversité biologique (CDB). Il est à noter que la création du GIEC en 1988 a été une initiative moins médiatisée mais où les scientifiques ont joué un rôle essentiel. Instance composée de scientifiques, qui produit des analyses et des synthèses scientifiques, ses documents sont destinés à éclairer leurs confrères, les décideurs et la société toute entière sur les enjeux qui se nouent autour du réchauffement climatique. Les succès du

GIEC sont réels mais il n'a pas fallu attendre longtemps pour que les craintes émises par nombre de scientifiques et d'organisations environnementales à l'issue de la signature de l'Accord de Paris se révèlent fondées. Ce retour aux réalités peut légitimement s'avérer frustrant pour les communautés scientifiques dont on exige comme qualité première la cohérence du raisonnement et le respect des principes de causalité. Mais il ne doit pas freiner pour autant l'implication nécessaire du scientifique dans le débat public qu'il doit éclairer. De nombreux acteurs de la société, exigent légitimement un plus grand engagement pour mettre le résultat de nos recherches au service de la conception et de l'implémentation de politiques environnementales, visant à assurer le développement durable de la planète.

Ce lien fort entre science et société s'incarne désormais dans les Objectifs du Développement Durable (ODD), au nombre de 17, officiellement avalisés par l'assemblée générale de l'ONU en 2015. Déclinés en 169 cibles et 244 indicateurs, les ODDs répondent aux objectifs d'un agenda politique et se sont imposés dans le paysage sémantique et programmatique, tant au niveau international qu'euro-péen ou national. C'est aux scientifiques de transformer en questions et verrous scientifiques ces objectifs politiques et ainsi apporter leur compétence à la construction des ODDs. Plus spécifiquement encore, alors que l'importance de l'approche systématique du changement global ne fait aucun doute les ODDs sont énoncés en silos sans porter attention aux nombreux facteurs qui les relient et encore moins aux contradictions entre certaines cibles. Il est donc de notre responsabilité de continuer à montrer l'importance des approches systémiques et de replacer ainsi les ODDs dans un système complexe permettant de lier la formulation

onusienne et la reformulation que nous pouvons en faire en termes de questionnements scientifiques. Ce travail matérialise pour nos communautés une part du lien entre science et société, et constitue aussi une démarche scientifique en elle-même portant de nouveaux défis de connaissance sur le fonctionnement des socio-écosystèmes, tout en associant les objectifs des différentes conventions sur la biodiversité, la désertification et le climat. À titre d'exemple l'ODD 13 sur le climat s'est traduit par l'adoption des INDC, cibles et indicateurs politiques mais qui peuvent être utilisés comme bases de départ pour une réflexion sur les trajectoires énergétiques décarbonées dans différentes régions du monde –voire pour l'ensemble de la planète, et sur ce que cela implique pour le cycle de l'eau, la biosphère ou les sols. En outre, le suivi des INDC requiert la mise en œuvre d'outils de monitoring congruents avec ceux déployés par la communauté SIC. Il existe donc dans ce domaine un lien objectif et naturel entre les requis scientifiques et les requis politiques.

Que le lien entre science et société se matérialise par la déclinaison des objectifs des ODD en verrous et nouvelles questions scientifiques est pour autant peu compris encore des décideurs et notre communauté devrait s'organiser pour construire un discours et une démarche utiles à tous, renforçant notre capacité collective, cœur de notre méthode scientifique, en évitant également que chacun se retrouve seul face à ce débat. Cela doit donc se faire en lien étroit avec la démarche institutionnelle des organismes et institutions scientifiques comme par exemple la Task force dédiée aux ODDs qui a été mise en place au CNRS, pilotée par sa présidence

## LE TERRITOIRE : CIBLE DE LA RECHERCHE EN SIC ET ÉCHELLE DE CONVERGENCE ET D'INTERDISCIPLINARITÉ

Une prise en compte plus poussée des besoins de la société nous ramène aussi vers des échelles plus proches de celles des territoires. Si les communautés traditionnelles du climat ont été naturellement à la pointe du débat, les sciences des surfaces continentales sont celles qui, seront directement concernées, et interpellées, par les enjeux du changement global à l'échelle des territoires. En parallèle, la communauté du climat s'est considérablement élargie thématiquement et met de plus en plus l'accent sur les approches régionalisées, le territoire constituant donc aussi un lien de rencontre des communautés et de plus grande interdisciplinarité. En formulant mieux ce qui doit être pris en compte pour comprendre l'impact des changements globaux sur la zone critique aux échelles des territoires, la communauté SIC va s'ouvrir de nouveaux horizons de recherche et fournir des éléments essentiels pour venir en appui à la décision politique en matière d'environnement, à toutes les échelles de gouvernance.

Ce document de prospective organisé en 10 chapitres met en lumière chacun de ces enjeux : comprendre les processus individuels, les intégrer dans une démarche systémique, chercher les synergies entre ces processus et les verrons derrière les ODD, et donner à voir et à comprendre à la société notre démarche et notre contribution pour mieux l'associer aux mutations nécessaires. Cela nécessite des outils d'observation, d'analyse, de modélisation, mais aussi de nouvelles compétences à développer, aussi bien cognitives que transactionnelles.

Ce travail est le fruit de toute la communauté scientifique, encadrée par une analyse des membres de la Commission Spécialisée « Surfaces et Interfaces Continentales » (CS SIC) du CNRS, qui a permis de dégager les priorités pour mener cette réflexion prospective.





Source : pexels.com © Pixabay

# QUE RESTE-T-IL DE LA PROSPECTIVE 2013-2017 ?

## RÉSUMÉ GLOBAL

L'exercice de prospective précédent (2013) avait souligné un certain nombre de challenges et de verrous sur les thématiques de recherche, les approches et les outils de la communauté SIC pour étudier le fonctionnement et les dynamiques spatio-temporelles des surfaces et interfaces continentales et côtières dans le contexte du changement global au sens large. L'objectif de ce premier atelier de la prospective 2017 a été de souligner les avancées qui ont eu lieu ou qui demeurent des points d'attention, afin d'alimenter et de poursuivre les réflexions dans les ateliers transversaux. Sont ainsi abordés les 4 thèmes : flux de matière et d'énergie, fonctionnement des écosystèmes continentaux et littoraux, dynamique des éléments et des contaminants, et paléo-environnements. Sont abordés également les défis aux interfaces qui restent souvent des verrous, la structuration des services d'observation qui a été menée et qui a permis la constitution de l'Infrastructure de Recherche OZCAR, la nécessité de progresser sur la modélisation et le bilan et la réflexion pour faire évoluer EC2CO.

L'exercice de prospective précédent (2013), concrétisé par la publication du document de synthèse (Juillet 2014), avait permis de souligner l'obligation pour notre communauté de relever **un certain nombre de challenges sur lesquels des avancées ont eu lieu ou qui demeurent des points d'attention**. L'objectif de ce premier atelier de la prospective 2017 a été de souligner à la fois ces avancées et ces verrous, afin d'alimenter et de poursuivre les réflexions dans les ateliers transversaux qui ont suivi. Cet atelier a ainsi été préparé, et le texte rédigé, avec l'aide des porteurs d'ateliers et rédacteurs de la précédente prospective. La prospective 2013 avait été organisée autour de thèmes fondateurs, des défis aux interfaces et des « outils » qui caractérisent la recherche sur les surfaces et interfaces continentales et côtières, qui sont le fil conducteur de ce chapitre.

## DES THÉMATIQUES PLEINEMENT TRAITÉES, MAIS DES INTERFACES EN DEVENIR

La prospective 2013 avait été organisée autour de thèmes majeurs ; 4 thèmes qui conditionnent le fonctionnement et les dynamiques spatio-temporelles des surfaces et interfaces continentales et côtières dans le contexte du changement global au sens large. Ces dernières sont aussi qualifiées de Zone Critique pour la vie, puisqu'elles intègrent les différents compartiments et les interfaces avec l'atmosphère et l'homme.

## Des histoires de flux de matière : Flux de matière et d'énergie, altération, érosion, hydrologie

L'une des priorités identifiées en 2013 était de **mieux connaître, et mieux utiliser le potentiel des traceurs géochimiques et isotopiques, notamment des isotopes stables non traditionnels, pour élucider la mécanique des transferts au sein de la Zone Critique**. Les isotopes du Mg, Ca, Si... avaient par exemple déjà été utilisés pour quantifier le cycle de ces éléments dans le sol et les transferts sol-plante. Par rapport à ces études « mono-outils » nécessaires pour évaluer l'information que peuvent porter chacun de ces traceurs, qui se sont poursuivies au cours de ces 4 dernières années, des progrès importants ont été obtenus par le développement d'études multi-isotopiques et la combinaison d'un grand nombre de traceurs. Ces approches apportent un réel progrès pour imaginer ce qui se passe dans cette zone à très haute résolution spatiale et temporelle. Les équipes françaises ont été fortement impliquées dans ces développements autant analytiques que théoriques, menés souvent dans le cadre de collaborations et réseaux internationaux qui se sont développés autour de la zone critique, comme c'est le cas par exemple des travaux réalisés sur le Shale Hill Critical Zone Observatory aux USA. Ces travaux, comme ceux menés parallèlement sur les sites RBV, tel le site français du bassin versant du Strengbach (OHGE), illustrent l'intérêt de ces approches. À titre d'illustration, l'étude combinée des nucléides cosmogéniques (isotopes



du  $Be^{10}$ ) et des nucléides de la série de U, traceurs et chronomètres géochimiques développés et utilisés de façon indépendante jusqu'alors pour les thématiques de la zone critique, a montré l'intérêt de leur couplage pour caractériser la variabilité spatio-temporelle des taux d'altération à l'échelle des bassins versants élémentaires. Il est important de poursuivre ces efforts dans le futur.

La nécessité de mieux appréhender la **dynamique du cycle de l'eau** dans la complexité de ses mécanismes, **des flux d'échanges et des couplages entre les compartiments** des surfaces continentales et leurs interfaces (océan, atmosphère) a été soulignée. Les flux hydriques sur les surfaces et interfaces continentales restent trop souvent étudiés par morceau, en raison : de la multiplicité des compartiments hydrologiques avec des temps caractéristiques, des mécanismes et des processus très variables, et d'une physique généralement bien comprise à l'échelle locale mais, difficile à paramétrer aux échelles pertinentes de fonctionnement de l'ensemble de l'hydrosystème.

On peut toutefois souligner les efforts de développement des modèles hydrologiques intégrés qui prennent en compte les compartiments principaux de l'hydrosystème : routage de surface (rivière), écoulement de surface, compartiment souterrain incluant sol, zone vadose, zone saturée. Ces modèles intégrés reposent sur les capacités acquises d'homogénéisation de la physique et **l'arrivée d'une hydrométéorologie et d'une imagerie des surfaces continentales à haute résolution.**

Globalement, les outils de la géophysique de sub-surface, l'imagerie multi-spectrale et la géo-modélisation (ex. Gocad) ont permis une meilleure description du sous-sol et la production d'images « multi-spectres » d'un même objet du proche sous-sol.

**Quelques avancées marquantes peuvent être soulignées sur l'interface de la surface avec l'atmosphère,** qui répondent à des priorités identifiées en 2013. Ainsi, le couplage Physique-Biologie est davantage pris en compte dans les travaux récents de la communauté. On peut ainsi citer par exemple, des travaux sur les flux de composés azotés à l'interface avec l'atmosphère), l'émission et le transport aérien de virus entériques au voisinage de stations d'épurations, ou la mesure et la modélisation de flux d'émission microbien. Le développement d'outils de simulation a été poursuivi, avec la montée en puissance de la LES (Large-Eddy Simulation), permettant ainsi de les appliquer par exemple, à l'étude des incendies de forêts ou des dégâts forestiers pendant une tempête. Enfin, on peut noter que le couplage végétation – atmosphère a été davantage pris en compte, notamment aux échelles (sub-)mésos. À titre d'exemple, on peut citer ici des travaux sur l'influence de la forêt sur l'enneigement à échelle régionale.

### **Sur le fonctionnement multi-échelles et l'évolution des écosystèmes continentaux et littoraux sous contraintes naturelles ou anthropiques**

Parmi les questions majeures identifiées en 2013, la question du lien entre la dynamique de la matière organique (MO) et les activités biologiques, et ses conséquences sur les fonctions écologiques et le cycle global du carbone avait été soulevée. L'analyse sur les travaux menés par la communauté depuis quatre ans, par exemple au travers des projets soumis à EC2CO, montre que les mots-clés carbone, sol et matière organique apparaissent souvent dans les projets, et montre des projets entre bio-géochimistes et écologues. Mais, **l'intégration du lien entre activité biologique et dynamique de la MO dans le cycle du carbone** reste encore à développer.

La prise en compte du **rôle des organismes sur les propriétés et le fonctionnement des écosystèmes**, notamment dans le cadre du changement global, avait été soulignée comme l'un des challenges, qui restait encore à aborder. Lors des 4 dernières années, des travaux ont été réalisés sur les réseaux trophiques et les organismes ingénieurs dans différents milieux : ils concernent par exemple, le rôle pédologique des termites, le fonctionnement des réseaux trophiques lacustres et les flux de nutriments, la bioturbation et les activités microbiennes dans les sédiments. Des études sur le réchauffement climatique au niveau des organismes ont été également menées mais, ce sont plutôt des approches écophysiologiques qui ont été développées sur les organismes, allant rarement jusqu'au fonctionnement de l'écosystème.

La question récurrente du **changement d'échelle, à aborder par des outils de modélisation, d'observation et d'expérimentation (mésocosmes)** a fait l'objet d'avancées significatives depuis la prospective de 2013 : notamment avec la démocratisation de l'imagerie Infra-Rouge (IR) avec l'utilisation de drones, d'images satellitaires..., avec le développement d'outils d'observation et d'expérimentation de type mésocosmes pour les lacs (plateforme PLANAQUA) ou les rivières (canaux expérimentaux, ECOSCOPE LIEC). En revanche, la prise en compte du changement d'échelle par la modélisation et la question des dispositifs de taille intermédiaire pour étudier les échanges nappe-rivière ou encore la zone hyporhéique restent d'actualité.

**La capacité de résistance des organismes face aux changements globaux : conséquences sur la réponse des écosystèmes et validité des modèles existants.** Là aussi des avancées peuvent être soulignées avec l'apport de l'écophysiologie pour mieux comprendre la réponse des organismes aux stress environnementaux, mais, ce n'est souvent que de l'acclimatation/tolérance des organismes mesurée sur du court terme. La capacité de résistance des organismes passe aussi par la capacité d'adaptation des espèces et des populations sur du long terme (sélection des individus/gènes les plus performants). Cette adaptation est prise en compte pour les microorganismes pour lesquels les temps

de génération sont courts, mais, c'est plus difficile pour des organismes animaux, où il faut travailler sur de multiples générations. Enfin, il reste encore à intégrer ces données dans des modèles.

**Le lien entre le fonctionnement des écosystèmes et le fonctionnement des sociétés humaines** a été pris en compte lors des 4 dernières années au travers des Zones Ateliers, du développement d'Observatoires Hommes-Milieu (OHM) ou d'infrastructures permettant de multiplier les interactions entre chercheurs des Sciences de l'Environnement et des Sciences Humaines : par exemple la ville pour le Labex IMU (Intelligence des Mondes Urbains) ou le fleuve Rhône pour l'OHM rattaché à la ZABR. Cependant, il demeure nécessaire de développer ce dialogue entre chercheurs en Sciences de l'Environnement et en Sciences Humaines.

### **Du côté de la dynamique des éléments et des contaminants, la physico-chimie des interfaces, la biogéochimie, et l'écotoxicologie**

Si un certain nombre de points de ce thème ont connu des avancées majeures depuis la dernière prospective, d'autres requièrent de nouvelles investigations comme les questions de l'interdisciplinarité, des stress multiples (biotiques/abiotiques) et des multicontaminations, des contaminants émergents : organiques (médicaments, perturbateurs endocriniens) ou métalliques (nanoparticules, terres rares), qui sont maintenant pris en compte. De plus, il est important de noter l'essor majeur des sciences « omiques » (génomique, transcriptomique, protéomique, métabolomique) pour le lien avec le vivant.

L'ouverture vers la Santé et les Sciences de l'Homme et de la Société peut être soulignée, avec la thématique « One health » (cf prospective InEE 2016).

La communauté scientifique en écotoxicologie s'est structurée *via* des réseaux qui se sont constitués (réseaux Ecotoxicomic, RECOTOX INRA), et l'organisation de colloques, conférences (premier Congrès Ecotoxicomic, 2017, Rencontres scientifiques de l'ANSES sur l'effet des molécules seules ou en mélange, 2017, séminaire de rendu des projets scientifiques d'EC2CO en 2015).

Des avancées technologiques peuvent être soulignées : **sur les sources synchrotron, les techniques nano-SIMS, la nano-tomographie**, en termes de résolutions spatiale et spectrale, et de limites de détection/quantification, qui permettent de s'intéresser à une gamme plus étendue de contaminants à des concentrations du milieu naturel, aux liens entre contaminants et différents groupements fonctionnels de la MO, y compris de fractions macromoléculaires. Si ces outils sont maintenant disponibles, il reste néanmoins à en élargir et généraliser l'utilisation. Des avancées ont été également réalisées sur la « **modélisation théorique des interactions à l'échelle moléculaire** » (Ex. travaux sur les processus de fractionnement isotopique aux interfaces avec des minéraux).

Mais il reste néanmoins des verrous scientifiques majeurs tels :

- Les couplages entre processus physiques, chimiques et biologiques dans un même compartiment et leurs conséquences en termes de flux et de bilans,
- La compréhension des mécanismes et la **modélisation de processus aux différentes échelles spatiales** (du moléculaire au paysage, bassin versant) et **temporelles**. La transposition des processus élémentaires à de plus grandes échelles (temps et espace) est un domaine actif, mais la « **description à l'échelle du millimètre ou de centimètre** (celle de l'homogénéisation) » demeure encore un verrou important.
- Les **aller-retours entre observations *in situ* et études de systèmes analogues simplifiés**, le « retour » vers le terrain étant souvent en retrait; la définition de systèmes d'étude pertinents; la confrontation d'approches théoriques avec des données expérimentales pour validation et d'extrapolation,
- La compréhension des **interactions vivant non-vivant**, comme composantes et surfaces actives,
- **Les contaminations multiples**: dynamique et effets de stress multiples (biotiques/abiotiques),
- Le couplage dans les études des effets écotoxicologiques et de l'écodynamique des contaminants (dynamique de spéciation et de réactivité, études aux interfaces...), la prise en compte de l'effet rétroactif du vivant sur ces processus, pour **aller vers une écotoxicologie intégrative**.

### **Les paléo-environnements**

Dans le domaine des paléo-environnements, la prospective précédente soulignait la nécessité d'encourager : a) la calibration des marqueurs paléo-environnementaux et les expérimentations sur l'actuel, b) l'acquisition simultanée d'archives physiques, géochimiques, biologiques et documentaires, ainsi que la production de données quantitatives utilisables par les modèles, c) le développement des multi-proxies, de la programmation scientifique intégrée à la réutilisation post-programme des archives naturelles, et d) l'élaboration des cadres chronologiques fiables des derniers cycles climatiques à l'actuel.

Parmi les pistes identifiées pour structurer ces développements, la **création de rétro-observatoires** au sein des observatoires SIC est à encourager, pour profiter des expériences passées sur du temps long, enregistrées dans des archives géologiques. Le développement de **marqueurs de l'anthropisation dans les archives géologiques**, et l'exploitation de l'ADN ancien/ADN environnemental doivent permettre à cette communauté de s'intégrer dans l'anthropocène, et d'intégrer davantage la perspective paléo-environnementale dans les actions thématiques de EC2CO. En effet, on peut souligner qu'il y a eu peu de projets orientés sur les paléo-environnements dans les projets soumis et retenus dans EC2CO, ou dans l'action commune EC2CO-LEFE sur les quatre dernières années.

Les efforts sont à poursuivre pour raccorder les temporeli-

tés entre observations et rétro-observations, et mieux gérer les données et les observations (création de bases de données internationales). La question de l'évolution à long terme de la zone critique sur son fonctionnement actuel reste certainement un domaine à mieux caractériser par nos communautés, nécessitant peut être une plus grande intégration de la communauté ST « traditionnelle » à la communauté SIC. Le rapprochement avec les sciences humaines et sociales (géographes, économistes, urbanistes) devrait permettre aussi d'investir les milieux urbains.

## DES DÉFIS AUX INTERFACES

L'analyse de 2013 mettait en avant le **sol, élément essentiel de la zone critique**, comme un défi aux interfaces et soulignait des travaux fragmentés entre les approches géochimistes et écologiques. Les travaux conduits sur l'interface Sol se sont trouvés plus particulièrement analysés *via* un Réseau Thématique Pluridisciplinaire conduit sous la double tutelle CNRS-INSU/CNRS-INEE entre 2013 et 2015 avec la tenue d'une réunion de présentations scientifiques et débats (7-8/10/2014) et la publication d'un document de synthèse (Juillet 2015). Ainsi, on peut souligner des acquis en termes d'Interdisciplinarité, et de développements métrologiques (monitoring *in situ*, multitraçage, chimique, isotopique et moléculaire...). Mais des verrous majeurs persistent, notamment sur :

- la caractérisation *sensu lato* des hot spots réactionnels,
- l'étude des processus de stabilisation/déstabilisation des MO du sol (MOS), les impacts sur la dynamique du C des sols et l'intégration dans les modèles climatiques,
- les rétroactions du vivant sur les dynamiques du sol,
- la nécessité du couplage effectif entre temps longs et temps court dans l'étude des processus et des réponses aux forçages climatiques et anthropiques,
- la caractérisation des processus fondamentaux optimaux de préservation, atténuation, restauration et réhabilitation.

Par ailleurs, le **milieu urbain**, identifié comme un défi aux interfaces lors de la précédente prospective, reste un **objet d'étude à investir**, pertinent face à l'urbanisation croissante, qui devrait intégrer l'observation et la labellisation d'Observatoires ou réseaux d'Observatoires. L'étude du milieu urbain nécessite une pluri-disciplinarité au-delà de la communauté SIC, par exemple en association évidente avec des géographes, ou des archéologues, mais aussi des sociologues, des spécialistes du droit de l'environnement ou des économistes... Des efforts ont été faits ces dernières années pour mieux caractériser et comprendre ce milieu. On peut citer les infrastructures comme les labex BASC ou IPSL qui ont permis de financer des observations et le développement de modélisations sur la région sud de l'Île de France. Des applications opérationnelles sont développées, avec un fort lien avec les SHS/SPI, mais des verrous juridiques

importants existent : jardinage urbain ; reconstruction de sols, prise en compte de la qualité des sols dans les plans d'urbanisme. La végétation urbaine, l'hydrologie urbaine le microclimat urbain ou la pollution urbaine sont étudiés, mais, une structuration de l'observation sur ces milieux urbains reste à faire (ex : projet de SNO Milieux urbains).

Parmi les défis aux interfaces, le **littoral** est un lieu d'interface terre/océan/atmosphère avec de très forts enjeux liés aux changements globaux d'origine anthropique (urbanisation, aménagement, exploitation des ressources). Cet enjeu s'est traduit depuis quelques années par une action thématique récurrente d'EC2CO (DRIL), par une action transversale d'EC2CO avec le programme LEFE, pour soutenir notamment l'étude du continuum terre-mer, mais, a aussi fait l'objet un projet Défi soutenu spécifiquement par la Mission pour l'Interdisciplinarité du CNRS en 2015-2016, et d'un atelier de la prospective (voir Chapitre 9).

La **cryosphère**, qui concerne plus de 50 % des surfaces continentales, et dont l'évolution, en lien avec le réchauffement climatique, impactera de façon cruciale notre environnement à toutes les échelles spatiales et temporelles, est aussi une zone d'interface à ne pas oublier. L'effort important doit être poursuivi sur les observations de long terme, leur spatialisation, ainsi que sur la compréhension des processus et sur la modélisation future de cette composante majeure de notre planète.

Les questions de recherche de la communauté SIC se caractérisent aussi par des focus sur des « **hot spots/hot moments** » de flux et de réactivité ciblant certaines interfaces (Littoral, Sol/Basse atmosphère, Sol/Hydrosystèmes...). Plus généralement, la levée des verrous inhérents à une compréhension intégrative du fonctionnement mécanistique et dynamique de ces zones s'impose et passe par une appréhension multi-approche, interdisciplinaire des questions concernant les interfaces, dans une sorte de continuum. À titre d'exemple ; comment ne pas s'affranchir d'une vision continue de ce qui se passe depuis les têtes de bassins jusqu'aux zones littorales en y incluant l'impact des intrants anthropiques (agricoles, industriels, urbains) et la globalité de la dynamique des hydrosystèmes (rivières, aquifères...) assortie de leurs interactions avec le sol ou le substrat rocheux ? Ces focus sur des « hot spots/hot moments » pourraient également devenir d'efficaces outils d'une approche épistémologique de l'interdisciplinarité.

Nos questions de recherche imposent à la différence d'autres communautés, l'incontournable construction de solides passerelles autorisant les **couplages de temps (temps courts/temps longs) et d'espace (de l'atome au paysage)**. La généralisation de l'utilisation de l'imagerie multi-échelle incluant notamment, la spectroscopie, la géophysique de sub-surface et la télédétection, associée à la conduite d'une analyse critique de « l'historicité » des systèmes étudiés pour a) établir un lien dynamique avec le sys-



tème Terre aux échelles des temps géologiques et b) mieux appréhender les changements environnementaux de l'Anthropocène, sont des voies d'investigation prometteuses.

Si la prospective précédente a montré des capacités interdisciplinaires claires, nous devons amplifier, voire transcender cette interdisciplinarité requise par nos objets d'étude, questions scientifiques abordées et moyens d'investigation. Au-delà de l'analyse très fine du fonctionnement physico-chimique des différents systèmes classiquement étudiés par notre communauté, et par essence même de ce que représentent les SIC, une réelle prise en compte des couplages entre le milieu physique et le vivant, devient cruciale. Celle-ci doit inclure plus particulièrement une compréhension holistique des actions et rétroactions du vivant sur les processus physico-chimiques structurant les différents environnements des SIC. À ce titre, l'observation, l'expérimentation, et une **compréhension mécanistique du rôle du vivant** sur le milieu physique doivent permettre de développer des modèles de fonctionnement des SIC plus réalistes autorisant une efficace quête de bilan/projection/prédiction/scénarisation, et ce, à différentes échelles de temps et d'espace. Ceci passe sans doute aussi par la création d'espaces de formation, d'échanges, puis d'interactions des différentes communautés afin que les cultures, moyens d'investigation «percolent», et se mutualisent entre les communautés. L'objectif est d'aboutir à une culture réellement inter- et transdisciplinaire portée par des disciplines d'excellence, mais autorisant la saisie efficace de questions de recherche fondamentale d'envergure aux retombées sociétales avérées.

Enfin, la communauté SIC reste à l'interface entre CNRS-INSU et CNRS-INEE, et cette prospective se nourrit aussi de certains aspects abordés lors de la prospective du CNRS-INEE. Il convient aussi de poursuivre au sein de la communauté CNRS-INSU elle-même les rapprochements entre équipes des domaines SIC et TS pour renforcer davantage encore la prise en compte de la composante long-terme dans l'étude et la modélisation de la dynamique des surfaces et interfaces continentales.

## DES SERVICES D'OBSERVATION MIEUX STRUCTURÉS

Si l'on réfléchit en terme d'approche méthodologique et de moyens d'investigation, la dernière prospective a montré que de multiples thématiques scientifiques propres à l'analyse du fonctionnement des surfaces continentales s'appuyait sur de l'observation, de la mesure récurrente ou encore de l'expérience opportune montée à dessein pour cibler les actions, rétroactions d'un processus donné. Cet appui, relayé par les Services Nationaux d'Observation (SNO) et autres sites instrumentés, s'est avéré manquer parfois de coordination à l'échelle nationale, voire pour chaque pièce du réseau ignorer les attendus scientifiques et la production des autres. Un chantier important de mise en synergie des services nationaux réalisé par la CSSIC entre 2012 et 2015 a conduit aujourd'hui à la redéfinition claire des tâches d'observation et services rendus à la communauté, notamment par l'accès complet et facilité des «délivrables» de chaque service. L'organisation de «dialogues de gestion» communs à l'ensemble des services donne à chacun une meilleure connaissance de l'activité des autres, permet de s'inspirer de pratiques et d'organisations fonctionnelles astucieuses, et plus généralement améliore l'efficacité globale en évitant les redondances pour chercher la complémentarité. Cette analyse et nouvelle structuration ont fait l'objet d'un document officiel publié par l'INSU en 2015. La **constitution de l'IR OZCAR**, ajoutée à la feuille de route française des IR en 2015 procède de la même logique et fut le résultat direct du besoin de structuration et d'internationalisation de nos SNO, identifié par la prospective et cette IR constitue, avec les Zones Ateliers, le miroir LTER français de l'infrastructure européenne en construction eLTER.

Il ressort de tout ceci aujourd'hui un accès à des données de qualité, vérifiées et obéissant à des protocoles rigoureux et parfois partageables entre services, garantissant un accès à l'information très largement amélioré. Ceci étant, il devient prioritaire d'inciter les IR (sur lesquelles s'adosent tout ou partie des services), à améliorer les bancarisations, l'accessibilité et la diffusion de l'information *via* des portails unifiés renvoyant ensuite vers des supports spécifiques. Ceci implique l'assurance d'une pérennisation de la collecte et du stockage de données long-terme, la mise en place de réseaux transversaux facilitateurs de mutualisation de moyens et expertises et la garantie d'une interopérabilité des bases de données, en établissant des standards de codage de données, l'homogénéisation des métadonnées entre disciplines, l'établissement de règles de protection de la propriété intellectuelle mais, en favorisant cependant, la création de bases de données ouvertes. Notre communauté devra s'appuyer sur les pôles de données et de service pour cela, et notamment le pôle Théia.

## ASSEOIR ET DIFFUSER NOTRE EXPERTISE SUR L'EXPÉRIMENTATION TOUT EN SUSCITANT UNE PLUS FORTE DYNAMIQUE DE MODÉLISATION

Si le domaine SIC utilise efficacement l'Expérimentation à diverses échelles, la documentation de ces expériences, les raisons qui ont conduit à ces élaborations et plus encore les résultats restent trop souvent peu accessibles, voire inconnus. Pourtant, ces expérimentations peuvent s'avérer des éléments clefs de la compréhension de systèmes complexes et par exemple fournir des exercices de « benchmarking » sur lesquels on confrontera idées, théorie et modèles. Il semble opportun aujourd'hui de s'engager dans la voie d'un recensement volontaire des diverses expérimentations un peu conséquentes menées par le domaine SIC. L'objectif serait d'en sortir une bibliothèque accessible non seulement, source évidente de documentation mais également, de renouvellement et ou de confrontation d'idées sur la manière d'aborder l'étude de la dynamique des surfaces continentales.

Par ailleurs, notre communauté qui manipule des données complexes (multi-scalaires, multi-variables, multi-paramètres...) documentant mécanismes et processus dans la richesse des échelles locales et intermédiaires, se doit de progresser sur les pistes de la modélisation. Cette dernière étant non seulement, un exercice de test des vertus d'un cadre théorique mais également, le moyen d'interpréter des données, le domaine SIC doit héberger de nombreuses tentatives conceptuelles, théoriques et numériques d'analyses des faits d'observation. Il devrait également disposer d'outils prospectifs tels que des modèles génériques développés en moyens de tests d'hypothèses ou de capacité à analyser la physique pertinente d'un ensemble de mécanismes et processus. Il peut sembler opportun d'identifier ce qui se fait sur le territoire national *via* des fiches signalétiques préférentiellement associées à des exercices de tests ou de « benchmarking ». On pourrait dans un premier temps se concentrer sur le cadre théorie – modélisation numérique et préférentiellement (mais pas uniquement) associé à de l'expérimentation. Ce recensement pourrait rapidement permettre d'identifier des verrous sur les questions scientifiques prospectées, cerner les manques, et de manière générale tendre vers une meilleure définition des cadres théoriques qui fondent l'activité scientifique en SIC. À titre d'exemple, seule l'élaboration de théories et des modèles concernant le nécessaire emboîtement des échelles d'espace et de temps qui caractérise le fonctionnement des SIC, permettra de sortir du simple constat de la complexité du système.

La volonté manifeste d'amener à la modélisation une communauté pas toujours familière et/ou armée pour cette approche de modélisation a d'ailleurs été abordée lors des réunions de la CS SIC. L'organisation d'ateliers de réflexion, par exemple sur la prise en compte des processus biotiques versus abiotiques dans la modélisation des dynamiques spatio-temporelles des surfaces et interfaces continentales a été proposée.

## EC2CO, UNE ACTION INCITATIVE STRUCTURANTE

L'action incitative EC2CO a été créée il y a plus d'une dizaine d'années pour soutenir et fédérer la communauté scientifique SIC autour de grandes questions environnementales. Elle soutient des projets à risques, innovants et pluridisciplinaires, qui appréhendent le fonctionnement bio-géochimique, écologique, hydrologique et la dynamique des surfaces et interfaces continentales et côtières, soumises à des perturbations globales et anthropiques.

EC2CO reçoit un nombre de projets qui continue à augmenter: 200 projets soumis à l'appel d'offres 2013 et 238 à l'appel d'offres 2017. Bien que le budget d'EC2CO subisse une érosion significative (1672 k€ en 2013, et 1420 en 2017), le nombre de projets retenus reste autour d'une centaine par an, et le pourcentage de nouveaux projets retenus se maintient à un niveau qui reste attractif (29 % en 2017).

Afin d'évaluer la plus-value d'EC2CO, un questionnaire a été adressé aux porteurs de projets financés entre 2013 et 2016 (3 appels d'offres). L'analyse des 158 questionnaires reçus en retour montre qu'EC2CO conduit à 68 publications dans des revues internationales par an, soit une moyenne de 2,1 publications par projet. L'effet levier vers des appels d'offres plus compétitifs et des projets plus ambitieux en termes de durée et de consortium apparaît clairement au travers du nombre de projets EC2CO qui sont poursuivis par la soumission de projets ANR: ainsi 30 % des projets EC2CO font l'objet d'un dépôt de projet ANR ou d'une ANR financée. 70 % des projets EC2CO sont associés ou ont conduit à des thèses, et là encore l'effet levier d'un projet EC2CO accepté pour l'obtention d'une bourse de thèse peut être souligné. Enfin, la dimension du projet EC2CO, plus facile à monter qu'un projet ANR, ERC, européen, est accessible aux enseignants-chercheurs et aux jeunes chercheurs et enseignants-chercheurs.

Ces retours montrent aussi le soutien et l'attachement de la communauté à ce programme et au maintien d'une ouverture à des projets, mais aussi quelques remarques: « *Laisser le plus d'ouverture possible pour faire émerger des projets innovants et prospectifs...* », « *ouvrir aux longues échelles de temps* », rapport « *post-final* » 2 ans après la fin du projet, « *présentations des résultats des projets afin de faire le lien entre les proposants* », « *Élargir cet AO vers des aspects plus appliqués sur la valorisation des organismes et les biotechnologies* », remarques sur le financement de masters, sur le financement d'ordinateurs ou de temps de calcul, sur la durée du projet, l'arrivée tardive du budget...

EC2CO a évolué assez peu durant les 4 dernières années, en terme de contenu de l'appel à projets. Suite à la précédente prospective, qui soulignait un besoin de reconnaissance de la communauté étudiant l'interface terre-mer, une action commune avec le programme LEFE a été mise en place, qui a permis de soutenir une vingtaine de projets par an. Des mentions spéciales ont été ajoutées dans le texte de l'AO pour encourager les études par exemple, sur le sol (2017), l'appui sur les services d'observation, et des soutiens parti-

culiers à des projets par exemple, sur la modélisation (2016) ou sur le littoral (2018), en lien avec certains partenaires financeurs. Des journées scientifiques de rendu des projets EC2CO ont été organisées en 2015 (AT ECODYN) et en 2016 (DRIL) et la participation importante à ces journées témoigne de l'intérêt de la communauté pour ces rencontres. Mais la diminution régulière du budget d'EC2CO, qui si elle devait se poursuivre encore ne lui permettrait plus d'atteindre ses objectifs, pose la question de l'intérêt de nos partenaires.

La prospective 2017 doit ainsi permettre de poser les bases d'une réflexion sur le devenir et les perspectives d'évolution d'EC2CO en termes de contour et de contenu scientifique des AT, en termes d'organisation de l'appel d'offres et d'interaction avec d'autres programmes et avec les partenaires, et en terme de valorisation des données des projets (indicateurs de la recherche et de la communauté SIC et de son évolution).

### **RÉSUMÉ EXÉCUTIF**

**L'objectif de cet atelier de la prospective 2017 a été de souligner les avancées qui ont eu lieu ou les verrous qui demeurent des points d'attention par rapport à ceux identifiés lors de l'exercice précédent (2013). Ont été abordés les avancées et verrous sur le fonctionnement et les dynamiques spatio-temporelles des surfaces et interfaces continentales et côtières dans le contexte du changement global, les défis aux interfaces, les services d'observation, et l'action structurante EC2CO.**



Source : pexels.com © Pixabay

# COMMENT INNOVER AUSSI DANS LA COMMUNICATION DE NOTRE OBJET D'ÉTUDE ?

## RÉSUMÉ GLOBAL

Une communauté regroupée autour de la dénomination « Surfaces Continentales » ou « Environnements Continentaux » ou « Écosphère Continentale » (domaine SC ou EC). Une communication autour des milieux qui sont étudiés et des enjeux sociétaux mais aussi sur les impacts qui affectent ces milieux et leurs services rendus. Une communauté dont les recherches contribuent à une meilleure gestion des ressources et des risques.

Une communication efficace adaptée à la cible et à la population à laquelle elle s'adresse. Un développement de la co-construction des projets avec les partenaires ainsi que de la valorisation de ces projets sont des pistes importantes à renforcer ou à développer pour assurer une meilleure communication, voire une communication conjointe scientifiques/partenaires envers la société.

La communication, vrai métier, demande des moyens en personnels dédiés pour être efficace. Moyens aujourd'hui insuffisants qui doivent être renforcés au niveau des Instituts et/ou des laboratoires. Une communication qui doit aussi utiliser toute la palette des nouveaux moyens mis à disposition par les réseaux sociaux et le « digital learning », sans négliger la science participative, les manifestations « science-société » et les partenariats avec les associations de diffusion de la culture scientifique.

## CONTEXTE SCIENTIFIQUE, TECHNIQUE ET SOCIÉTAL, LES ENJEUX

L'objet central de nos recherches est cette fine pellicule à la surface des continents qui enveloppe notre planète Terre, allant de la basse atmosphère jusqu'au substratum géologique, regroupant une grande diversité de milieux (air, eaux, neige, glaciers, sols, sous-sols, karst, sédiments, tourbes, lacs, estuaires, zones côtières, sources, rivières et fleuves, zones humides...) au sein desquels se développent une non moins grande diversité d'organismes vivants. Cette diversité des milieux physiques et des milieux vivants induit l'existence de très nombreuses interfaces – entre milieux physiques et entre milieux physiques et milieux vivants – qui constituent souvent des objets d'étude en eux-mêmes. Cette complexité, et le fait qu'elle conditionne largement la vie sur terre, font des enveloppes continentales une véritable Zone Critique, les deux vocables faisant référence au même objet ; dans un cas on se réfère plutôt à un milieu plus ou moins bien délimité dans l'espace, tandis que dans le second l'accent est plutôt mis sur la criticité des enveloppes continentales pour la vie terrestre.

La surface des continents joue un rôle fondamental dans les grands cycles biogéochimiques de notre planète du fait qu'elle concentre l'essentiel de la vie terrestre. Elle est le siège d'une grande variété de processus physiques, chimiques et biologiques qui assurent son fonctionnement et son rôle régulateur. Ces processus contrôlent les transferts de matières biotiques ou abiotiques et d'énergie au sein des grands milieux qui la composent, ainsi que les transferts aux interfaces entre ces milieux. La surface des continents est le lieu principal des ressources biologiques, elle contrôle la qualité et la quantité des ressources en eau, elle est le siège de création des sols, et elle constitue un réservoir facilement exploitable de réserves géologiques, notamment énergétiques. Sous l'effet d'une pression toujours plus intense des activités humaines et de la surexploitation des ressources, la biodiversité est déjà largement entamée et la qualité des milieux considérablement dégradée par endroits. La question du devenir des surfaces continentales comme milieu de vie pour l'Homme et pour les espèces qui garantissent son existence est donc au cœur de nos problématiques scientifiques.



## ÉTAT DE L'ART ET VEROUS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Notre « objet d'étude » a toujours été soumis au cours des temps géologiques à des forçages naturels, en provenance du dessus (fluctuations climatiques, cycles astronomiques, astéroïdes...) et du dessous (dynamique de la Terre interne : volcans, séismes). Cependant, l'entrée dans une nouvelle ère que les scientifiques appellent l'Anthropocène, et dont la date de début est encore discutée mais dont les effets sont de plus en plus visibles, nous oblige à mieux considérer l'état et les évolutions de la Zone Critique pour la vie terrestre à des échelles de temps très courtes par rapport à celles qui caractérisent les fluctuations des forçages naturels.

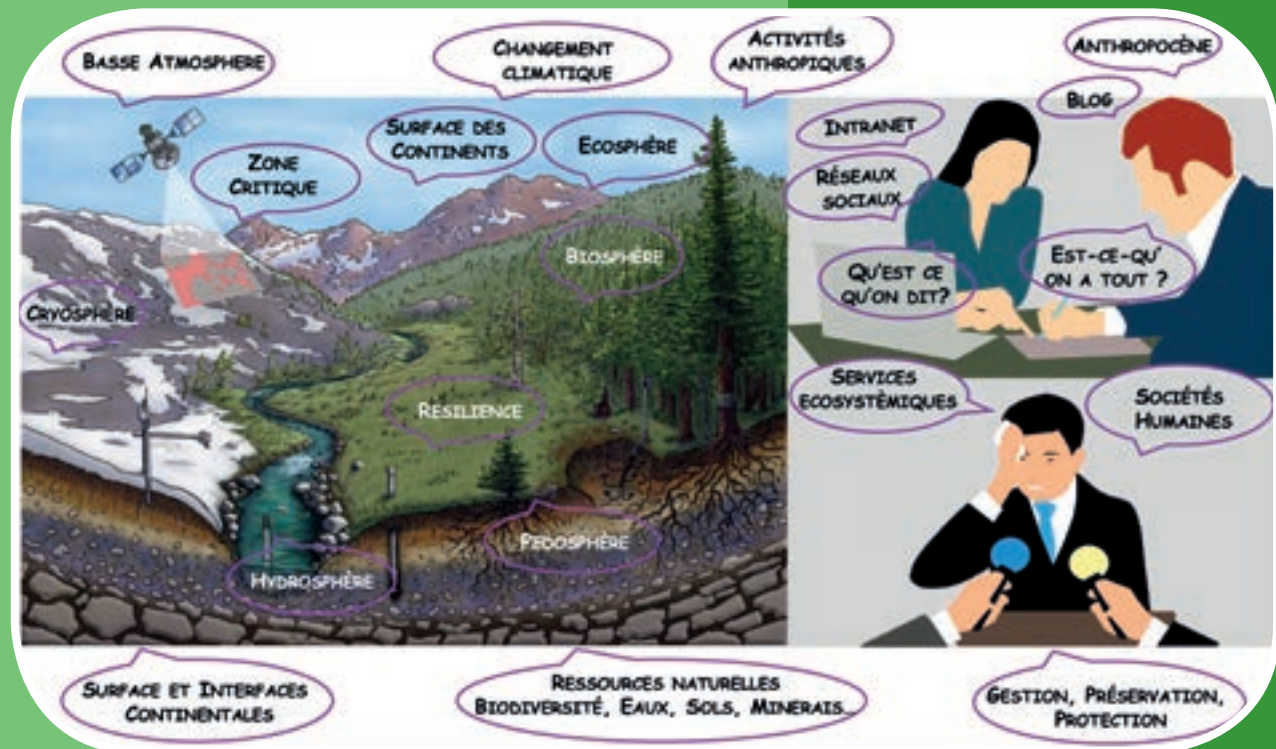
Ces constats nous amènent à réfléchir selon plusieurs perspectives. Tout d'abord nous connaissons encore mal le fonctionnement de certaines composantes et interactions au sein de la Zone Critique pour des états pseudo-stationnaires, d'une part parce que certains mécanismes n'ont été imaginés ou mis à jour que récemment et, d'autre part, parce que nos moyens analytiques sont en progression constante rendant accessibles des échelles inatteignables jusque-là, qu'il s'agisse de stockage, de transformation, ou de transferts. Ensuite, la caractérisation des changements globaux spécifiques de l'Anthropocène et de leurs impacts sur la Zone Critique constitue une problématique relativement récente mais qui devient centrale, posant notamment

la question des évolutions possibles selon différents scénarios, de la capacité de résilience des milieux et des mesures à prendre en compte pour la préservation et la gestion de ces milieux. Enfin, nous devons penser la relation entre les transformations aux échelles de temps courtes liées à l'action de l'humanité et les transformations aux échelles de temps longues induites par la fluctuation des forçages naturels.

On comprend que la notion même de Zone Critique et plus encore celle d'Anthropocène interdisent de considérer les sociétés humaines dans toute leur complexité comme simplement extérieures aux domaines scientifiques que nous représentons. Il est donc impossible que les spécialistes que nous sommes utilisons le modèle traditionnel de relations entre science et société, modèle qu'on pourrait appeler « diffusionniste » qui ferait de nos recherches une simple source d'information que le public se contenterait de recevoir avec plus ou moins d'intérêt ou de résistance — et de financer sans trop discuter. Les sociétés humaines ne sont pas en dehors de nos recherches et en attente de nos résultats, mais partout dans nos données sous la forme d'impacts multiformes — impacts auxquels elles sont directement et vitalemment intéressées. On ne peut donc limiter notre intérêt pour la société, ou l'intérêt de la société pour

**Comment dénommer notre objet d'étude et comment communiquer dessus ?**

(partie gauche : © NSF, partie droite : © Pixabay)



nos recherches à une simple relation pédagogique. La Zone Critique n'est pas une salle de classe. Nos intérêts et ceux de la Société sont par définition entremêlés et complémentaires.

Ce qui ne veut évidemment pas dire qu'il existe tout fait et, pour ainsi dire, sur étagère un modèle différent du modèle « diffusionniste ». Comme tout ce qui concerne la Zone Critique et ses différents milieux, il nous faut l'inventer ou, en tous cas, l'adapter à nos besoins.

Cette partie de la prospective du domaine a donc pour but d'esquisser en quoi la communauté des Surfaces Continentales doit innover également dans son rapport avec la société, l'enseignement, le débat public et la politique scientifique.

- La notion même de Zone Critique n'est pas plus facile à faire comprendre à nos collègues des autres disciplines, qu'à nous-mêmes ou qu'aux décideurs et au public. Elle diffère en effet des définitions classiques du globe, de la nature, de la terre ou de la géographie. D'où l'importance d'une analyse partagée, en lien avec le public, de la représentation de notre objet d'étude, de son originalité et de ses limites.
- L'un des traits des différents milieux de la Zone Critique à l'époque de l'Anthropocène, c'est que les actions humaines se trouvent partout dans nos données de manière plus ou moins prononcée et que chacun de nos sites d'étude se trouve immergé dans un milieu anthropique que nous avons souvent de la peine à prendre en compte. D'où l'importance de réfléchir en commun à nos propres conceptions de la société et de l'action humaine, de façon à étendre nos sources d'information et à approfondir notre image du monde social et politique. La leçon de l'Anthropocène c'est de rendre l'anthropos méconnaissable. C'est une occasion dont il faut tirer parti.
- Par définition, la présence des activités humaines dans tous nos sites, rend très difficile de protéger les résultats de nos études des questions de management ou de décisions politiques. Nous avons tous des expériences contrastées de ces rapports aux politiques, il serait utile d'en tirer les leçons pour trouver d'autres façons de nous comporter dans les controverses scientifiques et politiques, sans mettre en péril nos exigences cognitives et nos objectifs de recherche...
- Alors que nous avons défini un objet original qui prend en écharpe de nombreux savoir-faire et disciplines qui ne sont nullement limités aux sciences naturelles, nous continuons de l'enseigner sans prendre en compte l'originalité de notre objet ainsi que la singularité d'une période comme celle de l'Anthropocène. Pouvons-nous innover dans les modes d'enseignement et même dans les types de publication pour prendre en compte cette originalité et la présence multiforme des publics intéressés ?

## PRIORITÉS POUR LES ANNÉES À VENIR

Nous synthétisons ici les propositions qui ont été faites lors du colloque de prospective et celles émanant de laboratoires/organismes majeurs dans le domaine scientifique.

### Comment nommer le ou les objets de nos études ?

Notre domaine d'étude est défini par l'objet étudié, plus que par les disciplines scientifiques qui servent à l'étudier, à l'instar d'autres domaines étudiés au sein du domaine des sciences de l'univers, comme les océans ou l'atmosphère. Néanmoins, si la communauté scientifique, les politiques et les services de l'état, les partenaires socio-économiques et plus largement la Société comprennent relativement bien, de quoi on parle quand on traite d'océans ou d'atmosphère, ils ont du mal à cerner ce que recouvre le vocable de « Surfaces et Interfaces Continentales » (SIC) qui est la dénomination actuelle de notre domaine d'études. Une réflexion a donc été engagée pour mieux le dénommer de manière à ce que ce soit compréhensible par tous.

Cependant, le terme « Interfaces » est mal perçu et incompréhensible au sein de la communauté SIC. La communauté propose donc que l'on garde seulement « Surfaces Continentales » (SC) pour ne pas « brouiller le signal ». Elle propose aussi la dénomination « Environnements Continentaux et Côtiers » (ECC ou E2C) reprenant pour partie l'intitulé du programme scientifique majeur de la communauté, « Écosphère Continentale et Côtière » (EC2CO). Le terme « Zone Critique » généralement accepté par une grande partie de la communauté qui débat encore sur « la » ou « les » Zones Critiques est assez énigmatique (on ne sait pas de quel objet d'étude on parle) pour les extérieurs à la communauté et pour la société en général et le terme « critique » intrigue, voire inquiète.

Dans les propositions qui ont été formulées on peut lister en priorité, les 3 dénominations qui recueillent la plus forte adhésion de la communauté :

- Surfaces Continentales (SC) ou Surfaces des Continents, même si « surface » peut sembler limiter le domaine à la partie très superficielle, les sols.
- Environnements Continentaux (EC) ou Environnements Continentaux et Côtiers (E2C ou EC2CO) qui permet d'intégrer pleinement toutes les communautés
- Écosphère Continentale (EC) qui pourrait aussi être dénommée Écosphère Continentale et Côtière (EC2CO) comme le programme du même nom.

On citera aussi les 3 autres propositions qui ont été discutées et qui ont recueilli une plus faible adhésion de la communauté :

- Milieux Continentaux (MC) ou Milieux Continentaux et Côtiers (M2C)
- Enveloppes Superficielles (ES) ou Enveloppes Continentales (EC)
- Zone Critique (ZC)

Il est important de souligner qu'en termes de communication, il est plus difficile de communiquer à partir de 3 mots qu'avec 2 mots. Il serait donc préférable de garder une dénomination de notre objet étude en deux mots seulement: **Surfaces Continentales (SC), Environnements Continentaux (EC) ou Écosphère Continentale (EC)** pour ne garder ici que ceux qui recueillent la plus grande adhésion de la communauté.

### Comment communiquer envers la Société ?

Il est important tout d'abord de souligner que **la communauté travaille sur des espaces/milieus sur lesquels les gens vivent et sur des objets que la société utilise au quotidien**. Ces milieux sont aujourd'hui soumis à des forçages et à des changements d'origine multiple.

Il semble donc qu'il soit plus facile pour la communauté et plus pertinent pour la société de **communiquer sur les enjeux** qui mobilisent la communauté et **sur les impacts** qui affectent les milieux étudiés ainsi que sur les recherches de la communauté portant **sur la restauration et la préservation de ces milieux**. La communauté doit donc communiquer **sur la fragilité** de ces milieux et **sur leur capacité de résilience, d'adaptation et de rémanence** que le public reconnaît. La communauté doit donc mettre en avant la **gestion des risques** (crues/inondations, pollutions, éboulements/glissements de terrain, santé...) et **des ressources naturelles** (eaux, sols, biodiversité...) comme l'une des finalités de ses recherches, et le développement **d'outils d'aide à la décision et à la gestion intégrée** à l'échelle du territoire pour un **développement durable de notre environnement**.

La communication doit être centrée d'une part, sur **les objets que nous étudions** comme l'eau, les sols, les écosystèmes et **les services rendus** par tous ces milieux et d'autres part, sur les **grands enjeux et les impacts qui affectent ces milieux** comme la pollution, l'érosion, la déforestation, la perte de biodiversité... En axant la communication sur **les services écosystémiques**, on peut montrer à la société que nos objets d'étude aujourd'hui menacés/perturbés par les diverses activités anthropiques pourraient à nouveau rendre pleinement ces services s'ils étaient réhabilités, préservés et protégés.

Il s'agit donc ici de bien montrer le rôle de notre/nos objets d'étude(s) dans les questions sociétales pour mieux sensibiliser le public à nos recherches et lui permettre de mieux comprendre que nos recherches concernent aussi les interactions entre les différents milieux et entre les milieux et les organismes vivants (atmosphère/végétation-sols, sols/eaux de surface et souterraines, bassin versant/zone côtière...), formant ainsi la connectivité entre ces différents milieux.

Le texte introductif montre bien les difficultés à communiquer sur **un objet aux frontières peu définies**, mais pourtant au centre de nombreux questionnements de la société. Nous devons donc aller vers une analyse partagée de cet objet d'étude avec la société **en communiquant à partir des problèmes sociétaux** et en montrant mieux le rôle de notre

objet d'étude dans les processus anthropiques et naturels mis en cause. Pour atteindre cet objectif, **la communauté pourrait aussi s'associer à d'autres communautés** travaillant sur l'Homme et la Société, sur le Climat, sur l'Histoire... et communiquer par exemple sur « notre objet d'étude et les changements climatiques » ou « notre objet d'étude et les dimensions historiques et humaines ».

Enfin, il est important de **définir la cible de notre communication** car on ne peut pas communiquer vers « le grand public » en général. On ne peut pas aborder les sujets de la même manière avec les enfants, les lycéens ou les étudiants, les adultes ayant des formations et des métiers différents, les personnes âgées... L'éducation/formation et les backgrounds académiques ne sont pas les mêmes, les intérêts ne sont pas les mêmes et la définition des mots clés de notre communauté ne résonne pas de la même manière. Il faut donc **adapter notre communication à la population à laquelle elle s'adresse** si l'on veut qu'elle soit efficace, voire percutante. Il en est de même pour la communication envers les politiques, les services de l'état, les collectivités territoriales, les agences, les associations, les industriels, le monde agricole et les différents partenaires socio-économiques. Il faut alors surtout ne pas donner l'impression que la communauté par ses recherches remet en cause le travail de gestion/préservation/restauration des milieux fait par les professionnels et les acteurs des territoires pour éviter de créer des situations potentiellement conflictuelles.

### Les outils et les moyens de la communication

La communication en direction de la société est **un métier à temps plein**. De nombreux laboratoires qui ne peuvent s'appuyer aujourd'hui que sur des personnels chercheurs ont du mal à communiquer. Très peu de laboratoires se sont dotés d'un chargé de communication. Les canaux de communication sont donc aujourd'hui utilisés par une minorité de laboratoires ayant des personnes dédiées à la communication. Il faut donc que les organismes et instituts de recherche (CNRS-INSU et CNRS-INEE dans le cas du CNRS) se donnent les moyens en renforçant la communication au niveau national ou/et donnent les moyens aux laboratoires de communiquer mieux sur leurs recherches et les résultats de leurs recherches. On peut imaginer la création de Cellules de Communication dont les missions seraient au-delà de la promotion des organismes ou des instituts, d'intégrer aussi la communication sur les projets scientifiques et sur les résultats obtenus et valorisés.

Au niveau des laboratoires, un des moyens pour mieux communiquer est de toujours privilégier **en amont la co-construction des projets** à développer avec les partenaires socio-économiques et de bien veiller **en aval à la transmission des résultats obtenus** et à **leur valorisation optimale** par les partenaires. On peut donc envisager une **communication conjointe scientifiques/partenaires** sur les projets menés en partenariat et sur les résultats obtenus.



Nos objets d'études se prêtent aussi à la **science participative** qui est aussi un excellent moyen de communication, les professionnels et les acteurs des territoires peuvent par ce moyen venir enrichir nos recherches qui sont alors mieux acceptées, comprises et perçues.

La communication passe aujourd'hui beaucoup par les **réseaux sociaux** qui s'appuient sur des textes courts et beaucoup sur le **visuel**. L'impact que la communauté peut avoir sur ces réseaux nécessite une présence quasi-permanente dans la « blogosphère » qui nécessite du personnel dédié.

Notre communication doit être « positive » et faire « rêver » la société, même si l'on parle de questions fondamentales, à l'image de la communication dans le domaine « Astrophysique ».

Les Instituts concernés par notre domaine doivent lui donner plus de place dans leur communication.

En ce concerne la **communication des scientifiques**, nous devons faire un effort pour développer et améliorer leur capacité à communiquer envers la société. Certaines pratiques pourraient améliorer leurs capacités en utilisant par exemple le « media training » déjà largement utilisé dans le monde de l'entreprise, du sport et de la politique. La communication scientifique dans les médias nécessite une capacité très forte de réaction à des questions pas toujours attendues en résumant un message complexe en une ou deux minutes. La communication demande aussi de la part des scientifiques une forte réactivité aux événements (par exemple crues, événements extrêmes, processus lents mis en lumière par le biais d'un événement externe), pour lesquels les médias demandent une caractérisation des phénomènes (causes, mesure du caractère exceptionnel, lien avec le changement climatique ou d'autres causes). Pour nous, il s'agit d'une occasion de parler de nos recherches. Notre incapacité à se plier à ce genre d'exercice peut parfois donner l'impression au public que certains de nos consensus sont fragiles (changement climatique, perturbateurs endocriniens...), diminuant ainsi l'impact de nos recherches et de nos actions.

Nous devons aussi travailler sur **notre façon de présenter l'incertitude** inhérente au développement du savoir. Quand elle est présentée de manière usuelle, c'est-à-dire scientifique, elle est source d'inquiétude, voire de scepticisme. On pourrait alors être tenté de ne pas en parler, stratégie qui peut être payante à court terme pour susciter l'intérêt médiatique, mais « effet boomerang » garanti : « on nous a menti ! ». Il est important en parallèle de la présentation des incertitudes, d'être très clair sur le consensus « ce que l'on sait et qui est incontestable », rejoignant le besoin de parler de manière « positive ».

**Autres moyens** que l'on peut utiliser/développer pour la communication vers **différents types de publics** :

- **Les scolaires** : initier une démarche participative impliquant les écoles, où les élèves observent et mesurent en mettant en commun leurs apports, en se rapprochant le plus possible des thématiques de notre domaine et du quotidien des scientifiques qui vont sur le terrain. On peut ajouter à ces démarches, la Fête de la Science et les partenariats avec les associations (Association Science Technologie Société-ASTS et Association de diffusion de la culture scientifique-S[cube]) pour développer des outils pédagogiques (mallettes par exemple).
- **Le grand public** : développer les rencontres « Arts et sciences » qui permettent d'associer un art qui s'inspire de la science et une œuvre qui peut toucher un public non sensibilisé habituellement. Les animations pédagogiques (sous forme d'infographie interactive par exemple) les partenariats avec un musée autour d'une exposition sont aussi des moyens de communications intéressants.
- **Les étudiants** : réaliser et diffuser des vidéos/interviews qui montrent le travail au quotidien des scientifiques du domaine, les différents métiers et compétences nécessaires pour leurs recherches, les outils et techniques qu'ils utilisent, les objets et milieux étudiés, les enjeux et les questions auxquelles ces recherches répondent. On peut aussi organiser des journées « portes ouvertes » dans les laboratoires ou sur le terrain, et développer des « digital learning solutions » comme les MOOC (formation en ligne ouverte à tous pour faire connaître votre expertise, former une communauté ou recruter de futurs collaborateurs), SPOC (formation spécifique réservée à petit groupe), COOC (formation ouverte à toute une population pour former un large communauté)...
- **Les organismes de recherche** : il faut veiller à mieux partager les ressources communes, partager les efforts de pérennisation des observatoires et infrastructures de recherche, co-financer les recherches communes (comme au travers du programme EC2CO et des IRs OZCAR « Observatoires de la Zone Critique » et RZA « Réseau des Zones Ateliers »), partager les prospectives et la rédaction de livres blancs, organiser des séminaires/ateliers de réflexions communs.
- **Les instances locales et les professionnels** : il faut se rapprocher des partenaires dès l'émergence des idées à prospecter et co-construire les projets ensemble. À l'issue des projets, il faut valoriser et transférer au maximum les résultats de la recherche vers les partenaires. On peut aussi organiser des « speed-dating » avec les partenaires socio-économiques pour présenter les applications possibles de nos recherches.
- **Les instances nationales et internationales** : il faut contribuer à la diffusion des messages en participant à des expertises, participer à des groupes de travail, contribuer aux réflexions et au fonctionnement des programmes qui financent les recherches de notre domaine

## RELATIONS AVEC LES OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE (ODD)

Améliorer la communication et innover dans ce domaine c'est aussi une façon de contribuer à l'éducation, notamment dans le domaine de recherche qui nous concerne. Une communication innovante sur nos recherches et les résultats de nos recherches envers les scolaires et les étudiants devrait contribuer à une éducation de qualité qui est le fondement pour améliorer la vie des gens et le développement durable. Des progrès majeurs ont été accomplis dans l'amélioration de l'accès à l'éducation à tous les niveaux et à l'accroissement des taux de scolarisation à tous les niveaux dans les écoles, mais nous devons aussi nous assurer que l'ensemble des élèves aient accès à notre communication, notamment dans les pays en voie de développement.

Le développement de nouveaux partenariats avec les différents gouvernements, le secteur privé et la société civile doit nous aider aussi à mieux communiquer sur nos recherches en co-construisant les nouvelles pistes et les projets de recherche et en améliorant le transfert et la valorisation des résultats de nos recherches vers et avec les partenaires socio-économiques. Ces partenariats efficaces sont nécessaires à tous les niveaux (local, régional, national et au niveau mondial) pour permettre une communication conjointe envers la société sur les objets et les milieux que nous étudions, sur nos recherches et sur les résultats obtenus pour aller vers un développement durable réussi.

La communication devrait nous aider aussi à renforcer l'accès à la science, à la technologie et à l'innovation dans notre domaine, notamment pour les pays en voie de développement, et la coopération Nord-Sud afin d'améliorer le partage des savoirs et atteindre tous les objectifs de développement durable.

## CONCLUSION

Notre communauté et notre domaine de recherche devraient se regrouper autour de la dénomination « Surfaces Continentales » ou « Environnements Continentaux » ou « Écosphère Continentale ». La communication de cette communauté envers la société doit se faire autour des objets/milieus qui sont étudiés, des enjeux sociétaux qui leur sont associés et des pratiques et usages qui les impactent. La communauté doit montrer aussi que ses recherches concernent des milieux fragiles et fragilisés par les activités anthropiques et les services rendus par ces milieux à la société, en prenant en compte leur capacité de résilience et d'adaptation pour contribuer à une meilleure gestion des risques et des ressources.

Pour assurer une communication efficace, nous devons à chaque fois en définir la cible. La communication doit être adaptée à la population à laquelle elle s'adresse.

Le développement de collaborations avec les acteurs du monde non académique et la co-construction des projets avec les partenaires ciblés, ainsi que la valorisation de ces projets sont des pistes importantes à renforcer ou à développer pour assurer une meilleure communication sur nos recherches, voire une communication conjointe scientifiques/partenaires envers la société.

La communication est un vrai métier et demande des moyens en personnels dédiés pour être efficace. Ces moyens sont aujourd'hui insuffisants et doivent donc être renforcés au niveau des Instituts et /ou des laboratoires de recherche. La communication doit aussi utiliser toute la palette des nouveaux moyens mis à disposition par les réseaux sociaux et le « digital learning », sans négliger la science participative, les manifestations « science-société » et les partenariats avec les associations de diffusion de la culture scientifique.

## RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Des recherches qui concernent la « Surface des Continents » ou les « Environnement Continentaux » ou l'« Écosphère Continentale » (domaine SC ou EC). Une communication autour des milieux étudiés et des enjeux sociétaux, des impacts qui affectent ces milieux et leurs services rendus. Les recherches contribuent à la gestion des ressources naturelles et des risques. La communication doit être adaptée à la population à laquelle elle s'adresse. Un renforcement de la co-construction des projets avec les partenaires ainsi que de la valorisation de ces projets pour améliorer la communication, voire développer une forme de communication conjointe scientifiques/partenaires envers la société.



© Frédéric Delarue (STO, CNRS)

# DE L'OBSERVATION À LA MODÉLISATION : APPROCHES INTÉGRÉES

APPROCHE INTÉGRÉE : OBSERVATIONS/EXPÉRIMENTATIONS *IN SITU*, TÉLÉDÉTECTION,  
MODÉLISATION POST COP 21

## RÉSUMÉ GLOBAL

Face aux défis posés par les changements globaux, l'approche intégrée qui s'appuie sur la combinaison de données/expérimentations *in situ*, de données satellitaires et de la modélisation, vise à améliorer notre compréhension du fonctionnement de la zone critique, à prévoir ses évolutions possibles et fournir des éléments pour l'aide à la décision. Aujourd'hui, grâce notamment à l'émergence de nouvelles missions satellitaires et au développement des services nationaux d'observation (SNO), notre capacité d'observation de la zone critique est sans précédent. Explorer les synergies possibles entre ces sources de données (observées ou/et modélisées) pour mieux appréhender le fonctionnement de l'ensemble de la zone critique, plutôt que de ses parties prises individuellement, représente donc un des enjeux scientifiques et techniques majeurs de cette prospective.

## Introduction

L'approche intégrée telle que nous la définissons s'appuie sur l'utilisation conjointe de l'observation *in situ* et par télé-détection/expérimentation, et des outils de modélisations. Ce chapitre n'aborde pas les couples observation *in situ*/spatiales et observation/modélisation qui sont traités spécifiquement dans d'autres chapitres. Au cœur de l'approche intégrée et dans un contexte de nouveaux outils d'observation tels que les nouvelles missions spatiales il y a la volonté :

- de **relier entre eux les compartiments de la zone critique**, comme par exemple les compartiments sol/plante/atmosphère, le continuum terre-mer ou la surface/sub-surface,
- **d'analyser les contributions respectives et les interactions des processus d'origines biotiques, abiotiques et impacts anthropiques sur les variables d'intérêts** (ex. quelle est la part des processus microbiens, du climat et de l'action de l'homme sur les émissions de gaz à effets de serre du sol ?),
- **d'intégrer spécifiquement l'homme de manière directe (ex: prise en compte des pratiques agricoles) ou indirecte (ex: flux de polluants)** dans nos études en prenant notamment en compte les boucles de rétroaction quand c'est nécessaire (ex. pour la gestion quantitative de l'eau).

Les questions scientifiques clés, les enjeux, les verrous

technologiques, instrumentaux, méthodologiques et organisationnels liés spécifiquement à l'approche intégrée se nourrissent des discussions de l'atelier et des contributions reçues. Seront traités entre autres l'exploitation des synergies et/ou confrontation entre les différentes sources de données afin de réduire les incertitudes quant à la représentation des processus (ou systèmes) complexes et hautement variables dans l'espace et le temps. En particulier, des réflexions ont été menées sur les problématiques liées au changement d'échelle ou sur la nécessité d'adapter les systèmes d'observations (*in situ* et spatiaux) et d'expérimentations actuels /futurs ainsi que les différents types d'approches de modélisation spécifiques à cette approche intégrée.

Afin d'aborder cette problématique transversale, une ouverture vers les communautés autres que les Surfaces et Interfaces Continentales (SIC) devraient nous permettre de développer de nouvelles formulations, des outils innovants, et d'aborder sous d'autres regards les milieux étudiés.



## Contexte scientifique, technique et sociétal, les enjeux

La Science, la Technologie et l'Innovation font partie intégrante du programme de développement durable à l'horizon 2030 écrit par les Nations Unies (Sept. 2015). Ce triptyque doit fournir des moyens essentiels pour Comprendre/Prévoir/Aider à la décision dans un contexte de changements globaux. Plus spécifiquement, dans le domaine des Surfaces et Interfaces Continentales, les enjeux scientifiques prioritaires sont de « fournir une approche intégrative des écosystèmes à des échelles spatiales et temporelles différentes dans un contexte de changements environnementaux (passé, présent, futur) ». Ainsi, les conséquences du changement climatique, des changements d'occupation du sol, de l'augmentation de la population mondiale, de l'évolution des besoins alimentaires, des demandes accrues d'accès à l'eau potable, d'impact sociétal sur les écosystèmes terrestres/aquatiques et sur la biodiversité sont autant de challenges et de risques qui peuvent altérer significativement et durablement la quantité et la qualité des ressources naturelles (ex. les eaux continentales, les productions de biomasse...) impactant par voie de conséquence le développement de nos sociétés.

Les évolutions passées et futures de la zone critique<sup>1</sup> sont régies par des interactions et des rétroactions multiples entre processus physiques, chimiques et biologiques qui conditionnent les grands cycles biogéochimiques, et que viennent perturber de manière plus ou moins importantes les activités humaines. Ainsi, l'homme, en façonnant et en transformant les paysages, agit directement sur le milieu physique. En exploitant certaines ressources (minières, eau, végétales ou animales...), il modifie aussi les grands flux entre les compartiments de la zone critique. En résultent en particulier les changements climatiques, l'extinction de nombreuses espèces, l'épuisement des ressources nutritives des sols et une dégradation de l'état des ressources en eau. La population mondiale étant appelée à croître dans les prochaines décennies, et par là même ses besoins alimentaires et en eau potable, le maintien de conditions de vie décentes pour les générations de demain constitue un réel défi pour nos sociétés.

Bien comprendre comment l'activité humaine couplée aux changements environnementaux perturbe à différentes échelles de temps et d'espace le fonctionnement de la zone critique et *in fine* le bien être des Hommes est indispensable pour tenter de trouver des solutions conciliant développe-

ment des sociétés humaines et préservation des écosystèmes dont elles dépendent. Cela suppose une approche intégrée, permettant de relier les grands compartiments de la zone critique, ainsi que de caractériser les interactions entre le monde vivant et le milieu physique (avec en particulier la prise en compte explicite des actions humaines dans ces interactions et des phénomènes de rétroactions).

1 - Désigne la mince pellicule superficielle de la Terre à l'interface lithosphère-atmosphère/hydrosphère. Outre son rôle important pour les cycles de la matière, cette zone est critique car elle est caractérisée par la vie et concentre la plupart des activités humaines.

Prévoir l'évolution de la zone critique suppose également de comprendre comment les sociétés évoluent en réponse aux changements, car les grands enjeux environnementaux sont indissociables des enjeux sociétaux, or les scénarii actuels ne prennent pas suffisamment en compte les évolutions sociétales. Sur le plan scientifique, c'est un réel challenge et le succès de l'approche intégrée dépendra de notre capacité à développer des observations et expérimentations adaptées, mais également à développer des modélisations intégrées permettant l'exploitation de ces observations/expérimentations, réalisées à différentes échelles de temps et d'espace pour simuler des trajectoires d'évolution de la zone critique. Aujourd'hui, grâce notamment à l'émergence de nouvelles missions satellitaires à couverture globale et au développement des Services Nationaux d'Observation (SNO), notre capacité d'observation de la zone critique est sans précédent. Cependant, nos capacités d'analyse de ces nouvelles données, leur combinaison avec les observations « historiques » qu'elles soient *in situ* ou issue de missions satellitaires anciennes, restent bien en deçà des enjeux qui nous sont posés. Pourtant, l'analyse des évolutions récentes (dernières décennies) peut permettre de répondre à certains questionnements, en particulier en aidant à déconvoluer les effets anthropiques des effets climatiques. L'approche intégrée, qui propose la combinaison entre données de télédétection, modélisation et données *in situ* doit permettre d'aborder de manière plus transversale le fonctionnement de la zone critique en faisant intervenir différents champs disciplinaires (physique, écologie, hydrologie, géographie, agronomie, sociologie, économie...). Citons par exemple les études portant sur l'identification et la quantification des zones de régulation pour la qualité des eaux ou des secteurs d'approvisionnement en eau potable (dans un contexte de continuum terre/mer), ou celles portant sur l'étude des interactions entre le climat et les pressions anthropiques sur les services écosystémiques et leurs évaluations économiques.

L'approche intégrée consiste également à se rapprocher d'autres champs disciplinaires, comme les mathématiques appliquées, l'informatique, le calcul scientifique et la science des données, mais aussi à pousser le développement de nouveaux procédés d'observation et d'analyse en adéquation avec la démarche intégrée elle-même. Ce rapprochement a pour but 1) d'apporter à la communauté des connaissances approfondies sur le fonctionnement des SIC par le biais de méthodes telles que le traitement du signal, les analyses statistiques, les méthodes d'assimilation, le *cloud computing*, le *data mining*, l'interopérabilité des données hétérogènes, la représentation 4D du système étudié, mais aussi 2) de développer des algorithmes opérationnels ainsi que des plateformes numériques intégratives opérationnelles et évolutives. Dans ce contexte, il est important de rappeler que :

- les projections climatiques dépendent des modèles de surface qui intègrent plus ou moins bien les différentes interactions entre processus biogéochimiques et biophysiques.

siques, et les évolutions des pratiques liées aux processus d'adaptation des sociétés aux changements, qu'il soient climatiques ou socio-économiques;

- les différentes approches de modélisation sont trop souvent compartimentées et trop simpliste eu égard à l'ambition qui est affichée ici, et ce quel que soit le type d'approche de modélisation proposée (multi-agent, stochastique, déterministe, symbolique...); de même les formalismes intégrés dans les modèles sont fortement dépendants de l'état de nos connaissances des processus qui se doivent d'évoluer en fonction des nouvelles observations (ce qui n'est pas souvent le cas à l'heure actuelle);
- et enfin, une nouvelle ère s'ouvre grâce aux nouvelles missions spatiales (ex. les missions COPERNICUS de l'ESA comme Sentinel, A-TRAIIn de la NASA ou bien ou encore les missions à venir comme BIOMASS, TRISHNA, SWOT et FLEX) qui offrent gratuitement et à haute fréquence temporelle des capacités d'observations globales à résolution décimétrique nous conduisant à nous questionner sur les meilleures stratégies à adopter (selon le contexte de l'étude) pour exploiter cette richesse d'information sans précédent et répondre efficacement aux questions scientifiques et sociétales. Plus précisément, il s'agira de raisonner de manière contextuelle pour déterminer comment les observations spatiales couplées à la modélisation numérique et aux données *in situ* peuvent alimenter une approche intégrative tant sur les aspects conceptuels que opérationnels et répondre à des problématiques de société (ex: accès à l'eau potable, atténuation des changements climatiques) à des échelles spatiales et temporelles diverses dans un contexte de changements environnementaux (passés, présents, futurs).

Mieux appréhender le fonctionnement de l'ensemble, plutôt que de ses parties prises individuellement, représente donc un des enjeux scientifiques et techniques majeurs de cette prospective. Pour y parvenir, il s'agira de réfléchir à la meilleure façon d'utiliser les synergies entre les différentes sources de données (spatiales, *in situ* et issues des modélisations) et outils de modélisation pour analyser les variabilités spatiales et temporelles des variables d'intérêt et réduire leurs incertitudes. Cela passera entre autres, par la mise en place de stratégies de changements d'échelles et/ou de niveau d'organisation, spatiaux ou temporels, et d'évaluations confrontant ces différents jeux de données (validation croisée ou, si possible, validation externe).

## État de l'art

L'approche intégrée, qui peut concerner des problématiques scientifiques et sociétales très diverses, se heurte à des verrous scientifiques et/ou techniques spécifiques. Certains sont transversaux, et d'autres sont plus spécifiques aux approches de modélisation ou aux systèmes d'observation (*in situ*/télé-détection) qui la composent. De manière récurrente et transversale se pose la question de **l'exploitation optimale des 3 approches méthodologiques qui composent l'approche intégrée pour estimer au mieux les variables d'intérêt et réduire/évaluer leurs incertitudes**. Celles-ci peuvent être de diverses natures et tendent à se cumuler dans ce type d'approche. Citons de manière non exhaustive 1) les incertitudes liées à la technique de mesure, aux traitements des données, à l'expérience des expérimentateurs (Allen *et al.*, 2011), 2) les discontinuités temporelles et spatiales des mesures qui doivent être contrées par un remplissage des trous (*gap-filling*, méthodes d'interpolation spatiales et temporelles), 3) les changements d'échelles spatiales (agrégation, désagrégation) et temporelles (interpolation, synthèses temporelles, modèles de changement d'échelle temporelle) et évidemment celles engendrées par notre compréhension parfois trop superficielle des processus qui nous mène à représenter de manière trop simpliste (voire erronée) certains processus dans les modèles. À l'heure où les modélisations intégrées sont de plus en plus utilisées pour la prévision ou la stratégie de gestion de l'environnement, la communication sur les incertitudes de l'approche intégrée devient donc un véritable enjeu (Ramos *et al.*, 2010).

Une autre question cruciale est de définir la **meilleure façon d'aborder les changements d'échelles (spatiales et temporelles) pour répondre aux questions thématiques**. Il n'existe évidemment pas de réponse universelle aux deux questions évoquées ci-dessus. Seule l'expertise des équipes de recherches abordant chaque sujet d'étude peut permettre d'y répondre. Pour cela, elles s'appuient 1) sur la connaissance des jeux de données disponibles, de leur limites, des réseaux qui les alimentent, 2) sur l'identification des besoins éventuels en nouveaux jeux de données/mise en œuvre de nouveaux dispositifs d'observation (*in situ*, par télé-détection) et 3) sur l'analyse des outils/approches de modélisation existant ou devant être développés pour répondre aux questions spécifiques. La mise en œuvre de ces approches nécessite de la pluri- et de l'inter-disciplinarité, elle est souvent longue et complexe à mettre en œuvre. D'autres questions sont plus spécifiques à l'une ou l'autre des composantes de l'approche intégrée et sans être exhaustives, voici celles qui nous paraissent être les plus importantes.

**Observations *in situ* et par télédétection : faut-il repenser les observatoires / les expérimentations pour favoriser la synergie avec les données aujourd'hui disponibles par télédétection ?**

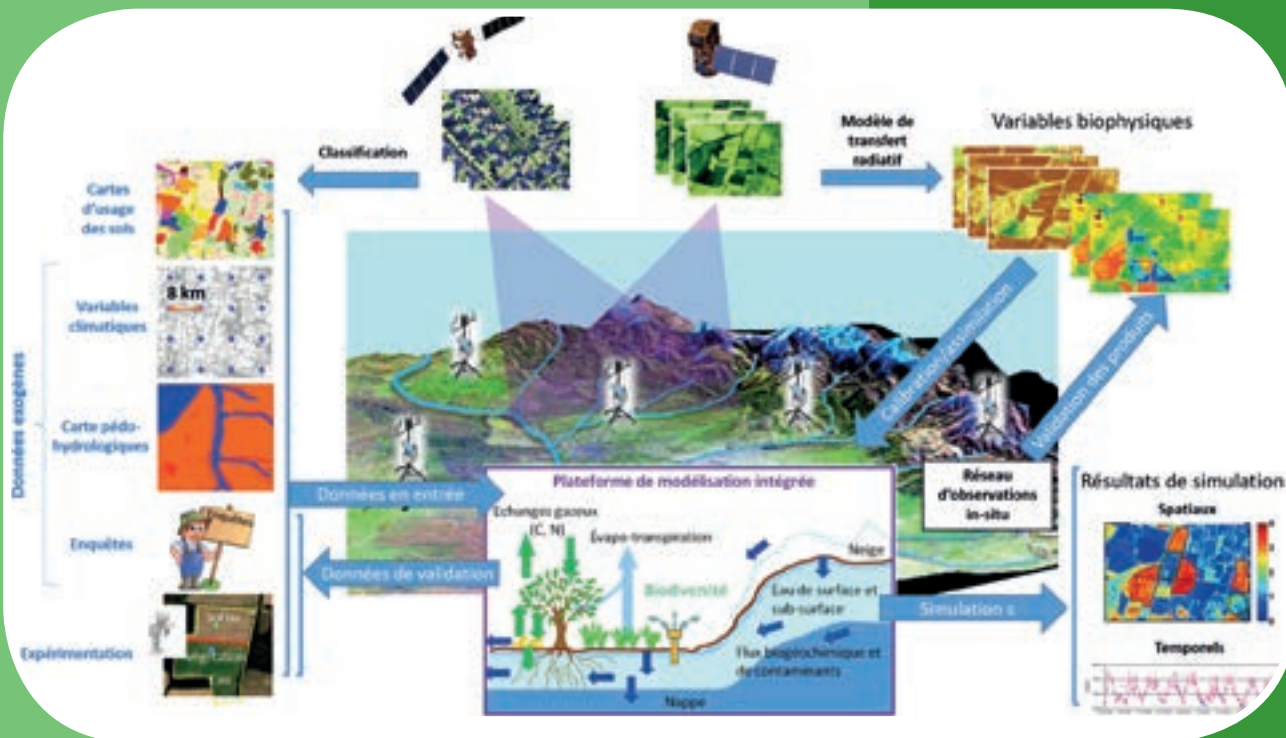
- Les observatoires mesurent-ils les paramètres adéquats et avec des méthodes appropriées pour alimenter/valider l'approche intégrée ? Par exemple, les flux de surface sont souvent mesurés au niveau parcellaire (ex. sites flux ICOS), voire à des niveaux plus fins (plante, organe...), quand certaines approches intégrées nécessiteraient des mesures de flux sur des ensembles régionaux ou des bassins versant (ex. *via* les méthodes de scintillométrie mais qui se limite aux flux de chaleur en surface) pour la validation des modèles. Cette contrainte nous amène logiquement à réfléchir aux besoins en développement de nouveaux capteurs et à la problématique générale des moyens relativement faibles (humains/financiers) alloués aux acquisitions de données terrain pour la calibration/validation (CAL/VAL) des produits satellitaires et des outils de modélisation. Très souvent les moyens alloués à l'acquisition des données satellitaires sont très déséquilibrés par rapport à

ceux alloués à l'acquisition des données terrain pourtant indispensables à la CAL/VAL des produits satellitaires. Certains programmes comme les TOSCA ou le PNTS ainsi que le soutien aux Observatoires (au sens large) permettent de pallier en partie à ce déséquilibre.

- Ce premier point nous amène à nous demander comment prendre en compte les hétérogénéités spatiales/temporelles *in situ* pour calibrer et valider les produits issus des missions spatiales ou alimenter/valider les modèles. À titre d'exemple, une bonne représentation spatio-temporelle des précipitations va nécessiter la mise en œuvre de réseaux complémentaires de stations météorologiques et de radars de pluie dont l'emplacement est raisonné en fonction de la densité régionale des stations mais aussi en fonction d'autres critères comme la topographie... Pour l'étude et le suivi de cette variable, comme pour d'autres d'ailleurs, il est légitime de questionner la pertinence d'un recours à des réseaux de capteurs low-cost, complémentaire à ces dispositifs de mesures. De manière plus générale, il s'agit de réfléchir à la façon de profiter au mieux des complémentarités entre données *in situ* et don-

**Exemple d'application de l'approche intégrée à l'étude du fonctionnement d'un territoire.**

© Frédérique Plas/CNRS Photothèque





nées spatiales, notamment dans les zones où les observations *in situ* sont peu denses (comme par exemple dans les bassins du Sud) et vice versa (précision locale des données *in situ* mais incertitudes générées par leur interpolation vs précision faible des données spatiales mais moins d'incertitude spatiale). Aussi, la génération de nouvelles données obtenues par approche de modélisation directe ou inverse permettrait d'optimiser les protocoles d'observations spatiales ainsi que la fréquence des mesures en fonction de la sensibilité des variables d'intérêts face à la réponse du système intégré.

- Dans un contexte de nouvelles missions spatiales (ex. Sentinel) et d'évolution des approches/outils de modélisation plusieurs autres questions se posent. Les observations réalisées actuellement ou par le passé sont-elles suffisantes pour répondre aux problématiques spécifiques d'une approche intégrée? Par exemple, le réseau de mesures *in situ* de fluorescence est-il suffisant ou doit-il être renforcé en prévision du lancement de la mission FLEX? Quelles sont la disponibilité et la diversité des mesures *in situ* permettant l'analyse et l'interprétation des signaux issus des satellites radar (mesures de rugosité, d'humidité des sols, structure de la végétation...)? Comment exploiter au mieux la richesse de l'information issue des observations faites par télédétection (ex. complémentarité optique/radar)? Quels sont les produits spatialisés qui font actuellement défaut et qui pourraient être élaborés à partir des observations actuelles/passées pour répondre aux besoins de l'approche intégrée ou réduire les incertitudes sur les variables d'intérêt? Citons deux exemples, la cartographie des albédos à haute résolution pour éclairer les approches type Solar Radiation Management dans une logique d'atténuation des Changements Climatiques ou encore la cartographie dynamique des pratiques de gestion des écosystèmes dont l'absence est source de fortes incertitudes dans les travaux de modélisation du fonctionnement de la zone critique (ex. export ou non des pailles pour réduire les incertitudes concernant l'estimation spatialisée des bilans de C des agro-écosystèmes). Un important travail doit donc encore être réalisé pour exploiter au mieux le potentiel associé à ces nouveaux jeux de données et pour développer des produits pré-opérationnels qui répondent aux besoins exprimés par les thématiciens et autres utilisateurs finaux.
- Mieux discerner l'impact anthropique des changements climatiques suppose également de disposer de chroniques suffisamment longues des variables d'intérêt. Dans le contexte de nouvelles missions spatiales, un important travail doit être mené pour s'assurer de la continuité d'observations comparables entre elles. Ce travail est déjà accompli pour certaines observations comme la pluie et les hauteurs altimétriques.
- Par ailleurs, les observations *in situ* actuelles sont-elles suffisantes pour répondre aux questions scientifiques émergentes traitées *via* des approches intégrées (ex. analyse couplée des contributions biophysiques/biogéochimiques au forçage radiatif pour définir les meilleures stratégies

d'atténuation des changements climatiques)? Sinon, quels sont les besoins en expérimentations spécifiques pour lever des verrous scientifiques et méthodologiques?

- Nos observatoires permettent-ils de tester de manière satisfaisante la généralité et la transposabilité des approches de modélisation intégrée et/ou pour valider les produits développés à partir des observations faites par télédétection? Le cas échéant, les SNO sont-ils suffisamment bien intégrés dans des réseaux nationaux et internationaux pour palier à ce manque et leur garantir une meilleure visibilité? Sont-ils aussi suffisamment connus/utilisés par la communauté du spatial qui est moins structurée que la communauté des observatoires (ex. intégration de l'Observatoire Spatial Régional dans la ZA PYGAR, dans OSCAR, dans le TGIR ICOS, dans les réseaux internationaux FLUXNET et JECAM et contribution à plusieurs CES THEIA)?

#### Quels sont les enjeux relatifs à l'approche intégrée?

De nouveau, et sans être exhaustif, les points qui nous semblent mériter en priorité l'attention de la communauté SIC sont:

- Comment faire évoluer les stratégies d'assimilation de données dans les modèles pour exploiter les données (*in situ* et/ou de télédétection) fournies par les nouveaux capteurs au maximum de leur potentiel (ex. apport de la haute résolution/drones ou de la complémentarité optique/radar dans les approches de modélisation) et réduire les incertitudes sur les variables d'état? Est-il nécessaire de faire évoluer dans les modèles certains algorithmes en fonction de ces nouvelles données? Comment faire appel aux mathématiques pour résoudre des processus non-linéaires (effets de seuil et non stationnarité des données) et faut-il compléter les approches empiriques par des approches déterministes à partir de la fouille de données? Comment prendre en compte les incertitudes et adapter les méthodes d'assimilation à ces plateformes? Comment mieux exploiter les données issues d'enquêtes, les analyse de cadre réglementaire? Enfin, en quoi de nouveaux paradigmes en sciences du traitement de l'information, tel que le cloud computing, peuvent-ils nous aider à faire face aux contraintes de «Volume» des données acquises (big data), de «Vitesse» de leur acquisition et de leur «Variabilité» pour la calibration ou la validation des modèles, ainsi que les résultats de modélisation?
- Comment faire évoluer les approches de modélisation vers des outils d'analyses multi-critères pour mieux répondre à des questions sociétales ou institutionnelles? Il nous semble, par exemple, nécessaire de développer les couplages entre modèles simulant flux verticaux et horizontaux, de mieux prendre en compte le vivant (végétation/microorganismes) dans ces approches et de mieux intégrer la dimension socio-économique dans ces approches (par exemple en combinant/couplant les modèles de processus, plus ou moins empiriques, avec des modélisations sous contrainte et/ou multi-agent et/ou symboliques). De manière plus générale, **la communauté SIC n'a sans doute pas suffisamment recours aux plateformes**

**de modélisation** (ex. OPENFLUID, MEANS, sol virtuel, RECORD... développées au CERFACS, à l'INRA...) ce qui doit l'amener à se questionner sur le choix des modèles à coupler pour répondre à tel ou tel objectif en s'inspirant/se positionnant par rapport au courant de l'« Integrated Assessment and Modelling » (IAM, Hamilton *et al.* 2015). Dans la communauté Climat, CLIMERI-France sert d'infrastructure nationale de modélisation. Elle met à disposition des modèles et fournit des simulations internationales et régionales. Rien de tel n'existe dans le domaine des surfaces continentales à l'exception de la plateforme RECORD pour les travaux spécifiques à l'Agronomie. Ces initiatives pourraient servir de modèle à une infrastructure de modélisation intégrée pour les SIC.

Enfin, l'utilisation de données multi-source définies à des échelles multiples (étendues, supports, espacements) pour la calibration/validation des modèles pose aussi la question des synergies entre les modélisations (physiques, empiriques, mathématiques, etc.): quelles sont les complémentarités des modèles en termes de calibration/spatialisation et comment exploiter ces complémentarités aux différentes échelles? Dans certains cas il pourrait être utile de **faire évoluer (ou coupler) les modèles déterministes**, qui prévalent encore dans beaucoup de domaines, **vers (avec) des modèles empiriques qui utiliseraient mieux les capacités de la fouille de données dans des flux de plus en plus denses** de données spatiales ou encore les modèles multi-agents pour intégrer la dimension sociale, et ainsi faire émerger de nouvelles structures et de nouvelles visions sur les processus mis à l'œuvre à la surface des continents.

### Citons quelques exemples d'initiatives/travaux pouvant contribuer à l'approche intégrée :

- MAELIA (Therond *et al.*, 2014) et l'approche de modélisation couplée SAMIR-WEAP-MODFLOW (Le Page *et al.*, 2012) sont probablement au niveau national ce qui se rapproche le plus de ce que pourrait être une plateforme dédiée à une approche intégrée à une échelle du territoire. MAELIA est une plateforme de modélisation et de simulation, multi-agents, permettant d'évaluer les impacts environnementaux, économiques et sociaux des changements combinés de normes de gestion de l'eau, d'activités agricoles et globaux (démographie, dynamique d'occupation du sol et changements climatiques). Elle n'intègre pas à ce jour la dimension télédétection et nécessite des informations qui ne sont pas disponibles partout, en particulier au Sud. Elle permet en revanche de représenter à des résolutions spatiale et temporelle fines les interactions entre les activités agricoles (choix d'assolement, conduite des différents systèmes de culture au sein de chaque système de production), l'hydrologie des différentes ressources en eau (basée sur les formalismes de la plateforme SWAT; Arnold *et al.*, 1998) et la gestion des ressources en eau (lâchers, restrictions, choix entre ressources). Les projets en cours d'extension des fonctionnalités de MAELIA permettront de traiter des questions relatives aux interactions entre systèmes de grande culture et d'élevage, cycles biogéochimiques, régulations biologiques, gestion territoriale des produits résiduels organiques et déploiement des systèmes agroforestiers et agroécologiques. L'approche de modélisation couplée SAMIR-WEAP-MODFLOW propose, elle en revanche, un outil d'aide à la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) se basant sur la télédétection spatiale pour l'estimation des besoins en eau en agriculture.
- Notons ensuite qu'il existe des outils de modélisation qui n'ont pas spécifiquement été développés pour assimiler/être calibrés par des données de télédétection mais qui en ont la capacité: SURFEX (Masson *et al.*, 2013) et ORCHIDEE (Krinner *et al.*, 2005) qui ont plutôt été développés pour servir de schémas de surface couplés à des modèles climatiques même si des questions thématiques spécifiques aux SIC sont traitées avec, TNT2 (Beaujouan *et al.*, 2002, Ferrant *et al.* 2014) qui résulte du couplage entre le modèle agronomique STICS (Brisson *et al.*, 1998; Brisson *et*

al., 2002) et le modèle hydrologique TOP-MODEL (Beven et Kirkby, 1979; Beven, 1997), SWAT (Arnold *et al.*, 1998; 2012)...

- Et enfin des modèles développés spécifiquement pour assimiler/être calibrés par des données de télédétection comme SAFY-WB (Duchemin *et al.*, 2015), EVASPA (Gallego-Elvira *et al.*, 2013), SARRAH-H (Vintrou, 2014)...

**Les deux dernières catégories constituent ou pourraient constituer l'essentiel des « briques » qui pourraient être mobilisées pour construire une plateforme de modélisation dédiée à l'approche intégrée** en fonction des objectifs de recherche mais aussi pour une utilisation potentielle vers les acteurs socio-économiques.

Cependant, dans les approches citées ci-dessus (hormis MAELIA), il n'y a pas de prise en compte de la co-évolution des systèmes naturels et des systèmes humains implicite à l'approche intégrée, i.e la prise en compte explicite de la dynamique des interactions entre les hommes et leur milieu. La prise en compte de ces interactions est aujourd'hui indispensable pour permettre des projections à long-terme des évolutions de la zone critique. Ce type d'approche qui consiste à mieux comprendre et à modéliser ce qui provoque les changements de comportement vis-à-vis d'une ressource comme l'eau, par exemple, est aujourd'hui incontournable et fait l'objet de nombreuses recherches. Une des principales limites actuelles de ces approches est la nécessité d'acquérir une connaissance approfondie du fonctionnement des systèmes humains avec en particulier une compréhension des facteurs culturels, sociaux, et normatifs, dans les processus de prise de décision vis-à-vis par exemple d'un usage ou d'une ressource particulière, ce qui limite la régionalisation des résultats. La tendance actuelle consiste à multiplier les cas d'études pour ensuite pouvoir « régionaliser » les résultats; dans ce contexte, la télédétection associée aux observations environnementales *in situ* doit être couplée à des enquêtes et travaux sur les « comportements » des sociétés et générer des outils de simulations adéquats. L'intégration de la RZA-LTSE dans l'infrastructure européenne E-LTER faciliterait la mise en cohérence avec les observations réalisées dans OZCAR ce qui représente une perspective prometteuse pour l'approche intégrée.

## Verrous

Certains verrous relèvent de l'absence ou de la **difficulté d'accès à des données** systématiques, ce qui peut entraîner de fortes incertitudes dans les simulations des variables d'intérêts: citons par exemple, la bathymétrie et dans certaines régions la topographie précise, la description des parties souterraines des plantes ou du sol, la couverture pédologique (types de sols et les propriétés en surface comme en profondeur comme la texture, la teneur en carbone organique, la teneur en calcaire...) et son humidité non superficielle, la qualité de l'eau dans tous les compartiments, la biodiversité des écosystèmes, les pratiques de gestion des écosystèmes et d'utilisation des ressources, et dans ce contexte des informations concernant les facteurs humains (culturel, normatif, etc.) qui conditionnent les comportements et prises de décisions. En ce qui concerne les données sol et climat, des plans de développement sont en œuvre (et pour certain bien avancé comme l'initiative Global Soil Map). Pour ce qui est des données sur les pratiques et leurs déterminants, il n'existe pas à ce jour de base de données à résolution fine disponibles. Les initiatives récentes pour pallier à ce problème (ex. GIS HPEE) ne semblent pas aboutir. Concernant les données de télédétection, le **manque de profondeur temporelle des données à haute résolution spatiale** pose aussi problème. Ce point nécessite de développer des méthodologies permettant d'intégrer et traiter les données à hautes résolutions (HR) spatiale et temporelle récentes aux données plus anciennes pour maintenir des observations comparables sur le long-terme.

D'autres verrous relèvent de notre **capacité à optimiser l'exploration et l'exploitation des informations contenues dans les données qu'elles soient *in situ* ou obtenues par télédétection**. En particulier, une limite systématique à l'utilisation des données spatiales est leur précision souvent moindre que celle des données *in situ*; en revanche, l'incertitude introduite par l'interpolation spatiale de données *in situ* conduit à des incertitudes importantes. Il est donc important de développer des procédés de validation croisée des différents produits et des méthodologies pour corriger les biais et pour quantifier les incertitudes. Une problématique similaire se pose également en termes de répétitivité temporelle. Là encore il est important de développer des méthodologies permettant de combiner au mieux les données *in situ* et spatiales. Depuis peu, **les nouvelles missions COPERNICUS à hautes résolutions spatiales et temporelles** (ex. Sentinel 1 et 2) **produisent des volumes de données considérables nécessitant des capacités de stockage et de calcul qui dépassent les moyens des Unités de recherches** (voire de certains Instituts). Cette nouvelle situation va entraîner des changements dans les outils et méthodes de travail créant un besoin en formation/accompagnement informatique des utilisateurs et un probable recours à des supercalculateurs/DIAS (Département Imagerie Aérienne et Spatiale) pour le traitement/stockage des données. Enfin, pour faciliter le développement de l'approche intégrée,

il faudrait pouvoir **tendre vers une production opérationnelle de cartes issues de la télédétection ainsi que vers la mise en réseau des bases de données des différents observatoires** (incluant la normalisation et l'adoption de protocoles communs).

**Enfin, l'approche intégrée suppose de renforcer l'état de nos connaissances, en particulier en rendant compte de la complexité des interactions**: organisation du vivant, facteurs biotiques, structuration du paysage et son évolution, pression qu'on peut étendre aux dynamiques sociétés-milieu pour rendre compte de la co-évolution des systèmes naturels et humains. Il est également essentiel de mieux documenter l'état, la dynamique de la biodiversité ainsi que son rôle sur le fonctionnement des écosystèmes et sur les services écosystémiques.

### Priorités pour les années à venir

Nous distinguons les priorités organisationnelles des priorités scientifiques.

#### Priorités organisationnelles

Pour favoriser l'évolution et le développement de l'approche intégrée, il nous semble indispensable d'instaurer un lieu d'échange (type colloque national annuel) centré sur cette approche mais aussi de créer une plateforme d'échange inter-instituts et inter-institutions autour des méthodologies, modèles et données mobilisées dans le cadre de l'approche intégrée. La communauté française devra aussi se positionner plus clairement à l'international par rapport à l'initiative IAM (Integrated Assessment and Modelling). Ainsi, les équipes travaillant autour de cette problématique pourraient partager/échanger leurs expériences, confronter leurs méthodologies et coordonner leurs actions en vue d'une meilleure intégration des différents outils au sein d'une ou plusieurs plateformes mutualisées. Il nous semble aussi essentiel d'impliquer plus fortement dans ces réflexions les jeunes chercheurs, les Ingénieurs et les Techniciens impliqués dans les SNO et de favoriser l'ouverture vers des communautés autres que les SIC: informatique, mathématique, sciences humaines et sociales mais aussi sciences de l'ingénieur et des systèmes (nouvelles formulations, algorithmes opérationnels, outils différentes novateurs, nouveaux regards sur les milieux étudiés).

**THEIA** pôle de données et de services surfaces continentales est conçu comme un facilitateur de l'utilisation des produits issus de la télédétection qui peut jouer un rôle essentiel pour alimenter l'approche intégrée. Les actions en cours, comme la mise en ligne d'un portail donnant accès à la fois aux données spatiales et *in situ* et proposant des services à plusieurs niveaux, depuis des produits clé en main (exemple coupe-rase) jusqu'à des produits nécessitant de l'expertise, vont dans ce sens. Ce portail est destiné à la fois aux utilisateurs scientifiques mais aussi aux collectivités locales. Cependant, le passage entre des produits pré-opérationnels proposés dans THEIA et les produits à destination d'utilisateurs finaux

(parfois peu expérimentés) nécessite des moyens importants. Il faudra donc veiller à ce que le dimensionnement des moyens de THEIA réponde aux objectifs de la communauté SIC. Certains de ces produits à valeur ajoutée pourraient d'ailleurs être pris en charge par des services générant de la valeur économique pour des acteurs privés, d'autres utiles à la communauté scientifique (exemple albédo, ou évapotranspiration) doivent encore trouver un modèle économique. La quantité d'information générée par les nouvelles missions spatiales (ex: Sentinel 1 et 2) et les modèles est un nouveau défi qui ne sera relevé que par des approches techniques intégrant les nouveaux paradigmes des sciences de l'information (Cloud computing, Big Data, Intelligence Artificielle, Deep Learning...). Cette évolution nécessitera une concertation au niveau national pour choisir les solutions/moyens les plus adaptées. Une réflexion devra aussi être menée pour mettre en place des formations/accompagnements aux utilisateurs potentiels.

**Système Terre**: L'infrastructure de Recherche **Système Terre** est en cours de construction. Elle a pour mission de: fédérer les pôles de données (AERIS, ODATIS, ForM@Ter, THEIA...), développer des portails coordonnés intégrant des services innovants de découverte, d'analyse, de traitements et de diffusion de données (sol, mer, avion, espace), favoriser des recherches intégrées et interdisciplinaires pour comprendre les processus associés au système Terre et aux changements globaux, et développer des partenariats européens et internationaux. Cette infrastructure devrait répondre à une partie des enjeux de l'approche intégrée (exemple le littoral ou les relations surface- sub-surface. Aussi, la création de **DINAMIS**, le portail d'accès à l'imagerie Haute et Très Haute Résolution Spatiale reprendra les mécanismes d'assistance aux utilisateurs mis en œuvre dans Theia, et devrait renforcer la dynamique de rapprochement entre les pourvoyeurs de données et de méthodes et les utilisateurs finaux, qui restent au cœur de la mission des pôles de données et de service.

**Ultimate Earth**: Ce projet, porté par les communautés internationales en sciences de la terre, et qui regroupe les infrastructures Européennes (ICES, <http://www.icesfoundation.org/>; EPOS, <http://www.epos-eu.org/>; IPBES, <http://www.iucn.org>; ICOS (<https://www.icos-ri.eu/>; ENVRI+, <http://www.envriplus.eu/>), bien que très ambitieux au regard des avancées conceptuelles et méthodologiques dans le domaine de l'approche intégrée est une initiative intéressante.

**Extreme Earth**: Le projet Extreme Earth qui devrait être porté au FET FLAGSHIPS – TACKLING GRAND INTERDISCIPLINARY SCIENCE AND TECHNOLOGY CHALLENGES regroupe Ultimate Earth et les initiatives dans le domaine du climat. Si Extreme Earth va également dans le sens d'une approche intégrée, les ambitions affichées de ces grands projets et des initiatives qu'il fédère ne doivent pas masquer les énormes progrès que doivent faire la communauté des sur-

faces continentales pour se fédérer et apporter les réponses nécessaires à la maîtrise et à l'application opérationnelle de l'approche intégrée.

**En résumé, il faudrait développer une communauté structurée et visible à l'internationale autour de l'approche intégrée et veiller à la bonne intégration des SNO dans les réseaux et initiatives (inter)nationales et pérenniser/renforcer les portails et plateformes existants (ex. THEIA) pour rendre accessible au plus grand nombre des produits opérationnels issus de la télédétection. Les actions en cours dans le Système Terre et les liens en train de se tisser avec les initiatives européennes et internationales vont dans ce sens. Il faudra toutefois veiller à ne pas perdre la spécificité nationale de certains produits/outils/plateformes qui permettraient de répondre avec plus de précision à certains enjeux/questions scientifiques.**

### **Priorités scientifiques**

Suite à l'analyse des questions scientifiques/enjeux spécifiques à l'approche intégrée, **il nous apparaît essentiel de continuer à faire évoluer nos observatoires/stratégies d'observation** (mesures spatialisées mobiles/ponctuelles dans le temps vs observations long terme, nappe de capteurs *in situ* faible coût, acquisition de données massives spatialement et temporellement) **de manière à mieux répondre à ces questions** puisque ce sont elles qui doivent déterminer les schémas d'observations et d'expérimentations et non l'inverse. **Nous devons aussi réfléchir au transfert du couple télédétection/modélisation** dans les sites peu pourvus en données *in situ* et jouer sur la mise en réseau des données, faciliter l'accès aux données des observatoires pour permettre la Validation-Calibration des données spatiales et tester la transposabilité des modèles à transférer. **Dans ce contexte, le pôle de données et de services surfaces continentales THEIA pourrait représenter un atout de taille.**

**Il s'agira aussi de mieux exploiter les autres portails de données** (ex. données concernant la biodiversité) et de développer les partenariats inter-instituts (partages de données), parfois avec le privé, **pour accéder à de nouveaux jeux de données mieux adaptés aux approches intégrées.** À titre d'exemple, la récupération de cartes de rendement auprès des coopératives agricoles, prestataires de services... (plutôt que la collecte de données *in situ* ou *via* des enquêtes) peut permettre de constituer des jeux de données plus exhaustifs, couvrant une plus large gamme de valeurs et donc d'obtenir des validations des modèles agronomiques plus précises et plus robustes (idem concernant les bases de données sur les pratiques *via* les chambres d'agriculture avec leur outil/base de données MesTerritoires). Dans ce cadre, des initiatives comme l'Institut de convergence DigitAG ou les approches Living Lab développées dans le cadre de l'Observatoire Spatial Régional ou du TIGA Dijon peuvent servir de modèle. Évidemment, les sciences participatives sont aussi des outils utiles de génération de données permettant d'impliquer les citoyens.

**L'interdisciplinarité, voire la transdisciplinarité, devra être au cœur des préoccupations de l'approche intégrée.**

Les outils (ou la plateforme) de modélisation devront notamment mieux prendre en compte l'Homme et ses interactions avec la zone critique. Il sera notamment nécessaire de collaborer plus étroitement avec la communauté SHS mais aussi avec d'autres communautés scientifiques comme les informaticiens et les mathématiciens qui nous permettront de tester de nouvelles formulations ou des outils de traitements de données de masses innovants (data mining, cloud computing, Intelligence Artificielle...). La modélisation (conceptuelle ou numérique) servira ainsi de support à l'intégration des nouvelles connaissances/méthodologies et devra être réfléchie comme un exercice collectif et collaboratif. Contrairement aux travaux réalisés dans la communauté océanique ou climatologique, l'idée ici n'est pas de construire un modèle unique collaboratif car les contextes, échelles, types de données sont beaucoup trop hétérogènes dans la communauté SIC pour qu'un modèle unique (voire un groupe restreint de modèles) puisse répondre aux enjeux et priorités des années à venir. En revanche, il est nécessaire de capitaliser et renforcer la modélisation dans cette communauté en repensant la conception des modèles comme un ensemble de sous-modules interfaçables, répondant à des spécifications différentes, interconnectées et disposant de modules documentés et transférables mis à disposition au sein d'une ou plusieurs plateformes communes (algorithmes, pseudo-codes, codes) pour une plus grande flexibilité et surtout une meilleure adaptabilité de la modélisation aux questions spécifiques dans chaque contexte et pour des échelles/jeux de données variés.

Dans un contexte de nouvelles missions spatiales, un point crucial concerne l'assimilation de données dans les modèles qui est au cœur de l'approche intégrée. **Les assimilations multi-variables ou multi-capteurs coïncidentes** (ex. optique et radar en télédétection) **peuvent permettre d'exploiter au maximum de leur potentiel les mesures *in situ* et de télédétection, d'améliorer la description du système ainsi que la compréhension de ses différents processus physiques.** Le couplage observations *in situ*/télédétection, expérimentation et modélisation doit aussi permettre de réduire les incertitudes des sorties de modèles. Nous devons en retour utiliser les modèles pour optimiser les réseaux de mesures *in situ* et de télédétection et pour faire évoluer les observatoires en visant un compromis entre haute résolution spatiale et temporelle. Il est aussi important de mentionner que dans ce nouveau contexte, il est critique de maintenir une qualité optimale des produits biophysiques en revisitant, en ajustant, en améliorant et en optimisant les méthodes actuelles ou en développant de nouvelles méthodes. Les méthodes d'inversion doivent d'ailleurs être repensées pour gérer simultanément et traiter rapidement de grands jeux de données, dans une perspective d'utilisation en « temps réel » à l'image du programme Copernicus. **Enfin, les besoins en nouvelles missions spatiales devront être discutés dans le cadre des Cospace (prospective CNES 2019) ou du PNTS.**



## Relation avec les Objectifs de Développement Durable (ODD)

2 - Également nommés Objectifs mondiaux, ils sont un appel mondial à agir pour éradiquer la pauvreté, protéger la Planète et faire en sorte que tous les êtres humains vivent dans la paix et la prospérité. Ces 17 Objectifs s'appuient sur les succès des Objectifs du Millénaire pour le développement, tout en y intégrant de nouvelles préoccupations telles que les changements climatiques, la paix et la justice, entre autres priorités. Ces objectifs sont étroitement liés les uns aux autres, le succès de l'un dépendant souvent de la résolution de problématiques généralement associées à un autre objectif.

L'approche intégrée est particulièrement bien adaptée pour renseigner les interactions entre les ODDs<sup>2</sup>. Cette approche est en phase avec le nexus des ODD 2 (Zero hunger), 6 (Clean water and sanitation), 7 (Affordable and clean energy), 13 (Climate action) et 15 (Life on land) (ICSU, 2017). Si on identifie les interactions clé comme les grands enjeux de l'approche intégrée, on peut citer: l'agriculture qui est une cause majeure de changement d'usage des sols, de dégradation des terres et de désertification; l'agriculture est de loin la principale activité humaine utilisatrice de l'eau douce (l'agriculture irriguée représente 70% des prélèvements d'eau) et elle contribue à plus de 10 % des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (elle représente aussi un fort levier d'atténuation...). L'augmentation des températures, les changements dans les schémas de précipitation, et dans l'intensité

et la fréquence des événements extrêmes affecte les grands flux biogéochimiques au sein de surfaces et interfaces continentales, la production des écosystèmes (en particulier agricoles) mais aussi la structure et les fonctions des écosystèmes terrestres et aquatiques dans leur globalité ainsi que plus globalement la biodiversité; les énergies renouvelables dépendent très largement des bio-énergies, des systèmes fluviaux et de sources dépendantes de la balance climatique (solaire, éolien). Si à travers ce prisme on fait le bilan des grands enjeux qui s'adressent à l'approche intégrée du système Terre, on identifie sans surprise le changement climatique et la production agricole et leurs impacts sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes et de la biodiversité incluant l'Homme sous toutes ses formes et ses impacts. Si les changements climatiques sont largement pris en compte par la communauté scientifique qui œuvre en modélisation/observation, la modélisation des systèmes agricoles, considérés comme des écosystèmes en interaction avec un système socio-économique dont les propriétés (ex. la production) émergent d'interactions entre processus biotiques, abiotiques et anthropiques, est un des enjeux clef identifié par cette prospective.

### RÉSUMÉ EXÉCUTIF

L'approche intégrée telle que nous la définissons s'appuie sur l'utilisation conjointe des observations *in situ*, par télédétection, et des outils de modélisation. Les enjeux scientifiques et méthodologiques liés à l'approche intégrée sont capitaux car elle peut nous permettre d'atteindre les ODDs et d'analyser leurs interactions. Pour cela, la communauté SIC 1) doit faire évoluer ses stratégies d'observation, notamment en lien avec les nouvelles missions spatiales, et renforcer son expertise scientifique en s'ouvrant vers d'autres communautés scientifiques pour développer des outils innovants tant sur l'observation que sur le traitement et la modélisation des variables d'intérêts 2) doit se structurer autour de l'approche intégrée pour être visible à l'international en s'appuyant sur les plateformes et portails déjà existants et en les renforçant. Aussi, afin de répondre aux grandes questions scientifiques posées par les changements globaux, la communauté doit penser la modélisation comme un support d'intégration des connaissances et d'interdisciplinarité et développer des plateformes de modélisation ouvertes et évolutives pour la recherche mais aussi visant à être opérationnelles pour le monde socio-économique.

## STRATÉGIE D'OBSERVATION À LONG TERME

### RÉSUMÉ GLOBAL

La compréhension du fonctionnement des surfaces et interfaces continentales, et leur évolution sous l'effet des changements globaux, nécessite une stratégie d'observation à long terme, qu'il convient d'optimiser et de pérenniser. Des dispositifs d'observation instrumentés, multi-disciplinaires, multi-paramètres et multi-partenaires, le plus souvent labellisés par les instituts (SNO, SOERE, ZA) ont été récemment structurés en Infrastructure de Recherche (IR : OZCAR, ILICO, ANAEE), afin d'améliorer leurs lisibilités et intégrer des structures européennes (eLTER). Cette prospective a identifié la nécessité d'intégrer la problématique Environnement - Santé, les écosystèmes tropicaux et urbains, la cryosphère et le compartiment régolithe, tout en poursuivant les observations spatiales et le développement d'algorithmes dédiés au traitement de grands jeux de données. Un des principaux enjeux sera de développer une démarche qualité, certifiant la fiabilité de la mesure, la traçabilité et la bancarisation des données.

### Introduction : Pourquoi une stratégie d'observation à long terme ?

Comprendre les mécanismes fondamentaux du fonctionnement du système Terre et prévoir ses évolutions possibles à différentes échelles de temps demeurent une préoccupation majeure tant de la communauté scientifique que de nos concitoyens. Les questions relatives à **l'impact des changements globaux sur l'environnement, la biodiversité, la santé et la réponse de la société** ne pourront être étudiées que si la communauté scientifique dispose d'observations sur le long-terme des processus biotiques et abiotiques. La stratégie d'observations à développer doit fournir un échantillonnage adapté à la diversité des **échelles spatio-temporelles des écosystèmes et au forçage des modèles bio-climatiques**, s'appuyer sur l'acquisition de chronique de données fiables et adaptées, fournir la possibilité de réaliser **des analyses rétrospectives et de développer des modèles**.

Par essence, les problématiques de la communauté SIC, comme le fonctionnement des écosystèmes sous contraintes naturelles ou anthropiques, les flux hydro-bio-physico-chimiques entre les différents compartiments de la zone critique (sol/ eau/ atmosphère, biote) les

interactions et rétroactions entre le milieu physique et le vivant recouvrent de nombreux domaines disciplinaires. Ces recherches bénéficient des données acquises *in situ* par des observatoires ou des sites, plus ou moins instrumentés, au sein de programmes à visée régionale, nationale ou internationale. Il est ainsi possible d'observer et de quantifier à différentes échelles spatiales et temporelles de nombreux paramètres abiotiques, biotiques, y compris, par exemple, le flux des gaz à effet de serre ou les événements hydrologiques extrêmes (précipitations, inondations, crues), voire les réponses sociétales qu'ils induisent.

Ainsi, l'acquisition de chronique de données sur la contamination des milieux permet une meilleure appréhension de la dynamique spatio-temporelle de cette contamination, et de son impact sur la biodiversité, les fonctions écologiques et les services écosystémiques, à différents niveaux du réseau trophique, et ainsi une meilleure compréhension de la trajectoire de ces anthropo - écosystèmes.

Les objectifs de cet atelier visaient I) à faire un état des lieux des **systèmes d'observation** à long terme dédiés au suivi conjoint des processus physiques, météorologiques, hydrologiques, géochimiques, biologiques et sociétaux, II) à recenser les **problématiques/objets/milieus/compartiments** peu ou mal pris en compte par les systèmes d'observation

existants et III) à identifier les **défis** et les **verrous** majeurs dans l'utilisation et/ou le développement d'outils et de dispositifs de haute technicité permettant d'optimiser et pérenniser ces observations à long terme.

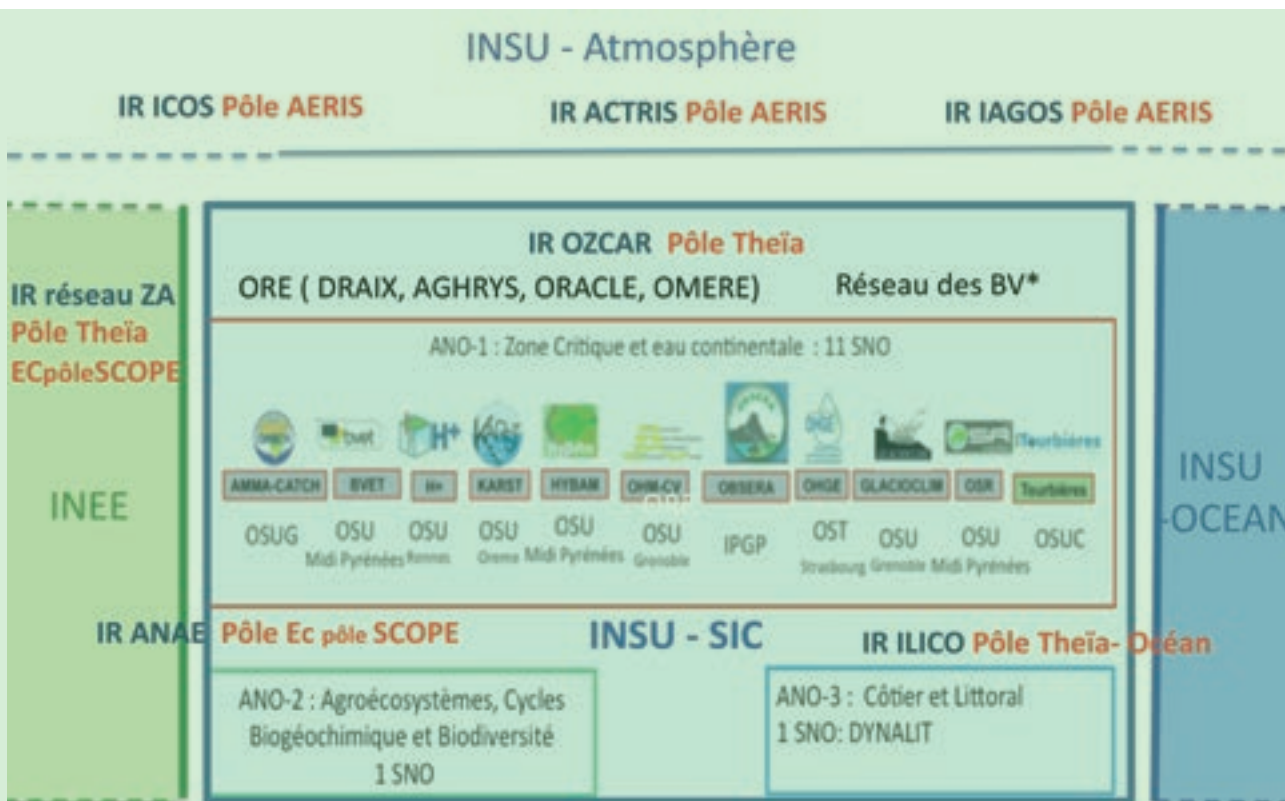
### Évolution des systèmes d'observation : vers un positionnement international

À l'issue des prospectives de 2013 la communauté SIC avait identifié les trois thématiques prioritaires suivantes, chacune d'elles s'appuyant sur différents systèmes d'observation labellisés par le CNRS (Services Nationaux d'Observation – SNO, Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement – SOERE, Zones Ateliers – ZA) :

- transferts d'eau et de matière au sein et en limite des systèmes continentaux;
- dynamique des écosystèmes en réponse aux forçages climatiques et anthropiques;
- évolutions géomorphologique, sédimentaire et hydrodynamique des zones littorales.

Ces systèmes d'observation, qui assurent le suivi des paramètres bio-géophysiques à différentes échelles territoriales (locale, régionale, nationale), reposent sur une approche

multi-disciplinaire, avec un niveau d'instrumentation permettant un suivi multi-paramètres et bénéficiant d'un soutien multi-tutelle (CNRS, INRA, IRD, IRSTEA). Au cours des 5 dernières années, ces différents systèmes d'observation ont progressivement été restructurés, au niveau national, en **Infrastructures de Recherche**, (IR – OZCAR, ILICO, ANAEE), labellisées par le ministère (Figure). Cette structuration, qui contribue à une meilleure lisibilité nationale, doit évoluer vers une labellisation européenne (AnaEE, eLTER), **voire internationale**.



\* Réseau des bassins versants: OPE, MSEC, OTHU, ERO

Structuration des systèmes d'observation



## Des Systèmes d'observations au service de nouvelles problématiques

### L'importance croissante d'environnements spécifiques dans un contexte de changement global

#### La zone tropicale

Sans négliger la surveillance à long terme des SIC sur le territoire national, qui doit rester une priorité, le suivi des zones climatiques mal connues, présentant de forts enjeux sociétaux et de développement durable, et surtout critiques pour de nombreux aspects des cycles hydrologiques et biogéochimiques, doit constituer un des objectifs de structuration des observatoires multi-organismes. Des initiatives ont déjà été lancées en milieu tropical par un groupe thématique portant sur l'observation, la compréhension et l'analyse du comportement de la zone critique dans la bande intertropicale face aux changements globaux au sein de l'IR OZCAR. Ce dernier s'appuie sur un réseau de SNO (AMMA-CATCH, BVET-MSEC, GLACIOCLIM, HYBAM) répartis le long de la ceinture intertropicale. Ce dispositif unique couvre une large diversité de contextes morpho-climatiques et hydrologiques ainsi que de pressions anthropiques.

#### La cryosphère

Des initiatives similaires ont vu le jour pour l'observation des différents paramètres de la cryosphère (glacier, pergélisol, manteau neigeux, microbiologie de la glace). Ces observations de long terme se sont structurées en France via le SOERE CRYOBS-CLIM, aujourd'hui inclus dans l'IR OZCAR. Certaines séries d'observations sont parmi les plus longues au monde, constituant ainsi un patrimoine unique pour le suivi du changement climatique. Il s'avère crucial de poursuivre les observations de cette composante très sensible du système climatique, réalisées depuis plusieurs décennies, et de mieux quantifier sur le long terme et à différentes échelles spatiales, afin d'en mieux connaître le devenir et d'en anticiper la gestion. À ce titre, le suivi des glaciers, l'extension du manteau neigeux saisonnier, la température du permafrost, l'albédo de surface sont ainsi reconnus, au niveau mondial, comme des Variables Climatiques Essentielles (ECV) par les instances internationales GCOS/GTOS. Des suivis ponctuels ou de long terme naissent aujourd'hui la nécessité, d'une part, de régionaliser ces observations notamment via la complémentarité entre les observations *in situ* et celles par télédétection (terrestre, aérienne ou spatiale) et, d'autre part, de poursuivre ou de proposer des synergies avec d'autres compartiments comme l'atmosphère et l'océan. Si l'observation des glaciers est labellisée comme SO depuis plusieurs années, ce n'est toujours pas le cas de l'observation du permafrost et de la couverture neigeuse.

#### Le milieu urbain

Un des défis majeurs sera de renforcer la politique d'observation des milieux urbains et péri-urbains dans le contexte d'une augmentation de la démographie à l'échelle nationale et internationale, qui s'accompagne d'une emprise croissante des villes sur les zones rurales ou forestières. Des problématiques jusqu'alors négligées, telles que l'augmentation des zones imperméabilisées (rues, parking et zones d'habitation), la reconversion des sols fortement anthropisés (friches industrielles) en lieux d'habitation ou en aires récréatives, et les îlots de chaleur devraient être intégrées dans des systèmes d'observations existants (e.g. OTHU).

### Un compartiment oublié: le régolithe ou réservoir de sub-surface

Au sein de la zone critique, le régolithe est aujourd'hui un compartiment peu étudié et qu'il conviendrait donc de mieux intégrer dans les systèmes d'observation. Ce compartiment correspond à la zone comprise entre la surface et la roche mère, où se situent des réservoirs d'eau différents du réservoir de surface, et constitue un lieu privilégié des échanges eau-sol-vivant. Dans le régolithe, les temps de résidence de l'eau, des éléments chimiques, dont les contaminants, peuvent atteindre plusieurs décennies, nécessitant, de fait, des observations à long terme. Définir la nature et l'intensité des processus biotiques, leur hétérogénéité dans l'espace, la résilience des écosystèmes est l'un des enjeux majeurs de l'observation du régolithe. Le régolithe étant un milieu très hétérogène, l'observation doit s'appuyer sur une caractérisation fine de la structure physique et de la composition chimique de ce compartiment, ainsi que de la structuration des organismes vivants vers la profondeur. Idéalement, elle combinerait des méthodes non destructrices applicables à grande échelle, comme celles utilisées en géophysique de sub-surface, par exemple au moyen des radars de sondage du sol, à des méthodes directes, localisées avec prélèvement d'échantillons pour mesure en laboratoire de paramètres liés à la chimie, à la microbiologie, et à la minéralogie, et à des mesures *in situ* de paramètres tels que la porosité ou la profondeur racinaire. Cette caractérisation est un préalable essentiel à l'interprétation des variables observées et à l'évaluation de la représentativité de la zone d'étude, notamment pour l'extrapolation à méso-échelle. L'observation à long terme de ce compartiment permettra d'améliorer la compréhension des processus et des temps d'interaction eau-régolithe-vivant afin d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes: jusqu'à quelle profondeur les réactions biotiques jouent-elles un rôle? Quel contrôle exerce la physique du milieu sur le transfert d'un polluant, d'un nutriment? Comment les espèces vivantes partagent-elles les ressources en eau ou en nutriments du sous-sol, quels seraient les effets d'une forte variation de stocks sur la dynamique des populations, comment analyser les effets de niche?

Paradoxalement, l'observation à long terme et la caractérisation du régolithe font particulièrement défaut dans les régions où il est le plus développé et où les échanges entre les compartiments sont les plus intenses, et en particulier dans la zone intertropicale. L'un des atouts de la communauté française est de disposer de sites extra-métropolitains instrumentés faisant l'objet de suivi à long-terme dans le cadre de collaborations internationales. Un des enjeux pour les années à venir consiste en la mise en place d'une stratégie nationale pour renforcer le panel d'observations sur ces sites pour en faire des sites internationaux de référence dans les domaines de l'environnement et du développement durable.

### **Une problématique émergente : la relation Environnement-Santé**

La relation étroite entre l'environnement et la santé humaine, qui découle de la notion « one health » apparue dans les années 2000, est un nouveau paradigme qui imprègne peu à peu l'ensemble de la communauté scientifique, et demande d'ouvrir notre approche multidisciplinaire au monde de la santé. Dans un contexte de changement global (changement climatique et augmentation de la démographie humaine et animale), la compréhension des liens environnement – santé, ou santé- environnement selon les écoles, est un enjeu majeur de santé publique pour les prochaines décennies.

Plusieurs problématiques, qui ne peuvent être abordées que selon des démarches intégratives multidisciplinaires, sont identifiées comme des défis majeurs. Ainsi, la quantification des niveaux d'exposition aux contaminants chimiques dont les contaminants émergents (perturbateurs endocriniens, résidus médicamenteux), et leurs conséquences sur la santé humaine et animale, nécessite une meilleure appréhension des variations spatiales et temporelles des concentrations, et de la biodisponibilité des contaminants, à court et long termes (y compris l'impact des événements extrêmes).

La relation entre les changements climatiques, l'anthropisation et leurs conséquences sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes, doit permettre une meilleure compréhension du déterminisme d'émergence ou de réémergence d'agents pathogènes. Les exemples récents du chikungunya ou de la peste à Madagascar, illustrent la nécessité de développer des démarches intégratives pour expliquer la dynamique de ces maladies vectorielles qui impliquent l'environnement, un vecteur animal, l'Homme et un pathogène. Plus récemment, une réflexion a été menée à l'échelle internationale sur la problématique de l'antibiorésistance, phénomène qui doit être appréhendé de façon globale, en considérant la circulation des antibiotiques, des micro-organismes et le flux de gènes de résistance et ceux participant à leur mobilité (i.e; intégrés) entre l'homme, les animaux, le sol et l'eau. (Millennium Ecosystem Assessment, <https://www.millenniumassessment.org>). À l'échelle nationale, différents réseaux de recherche se sont emparés de cette problématique et différents plans d'actions et des feuilles de route gouvernementale ont été élaborés (Plan National Santé Environnement (PNSE 2015-2019), Rapport Carlet pour l'antibiorésistance).

Dans ce contexte, la communauté SIC doit se positionner pour renforcer des recherches transversales sur cette problématique, recherches qui doivent reposer sur des sites ateliers pérennes intégrés dans des systèmes d'observation. En France, le réseau de zones ateliers (ZA) où se positionnent des observatoires ou des réseaux d'observation (CNRS-INSU), permet de développer des projets de recherche à l'échelle d'un territoire, qui reposent sur une démarche scientifique spécifique d'observation sur le long terme, et pluridisciplinaires, rapprochant les acteurs scientifiques, cliniciens, praticiens et institutionnels. Un réseau de sites emblématiques des différents usages (vétérinaire, exploitation animale, hôpital, milieu urbain ou rural), et des capacités d'épuration des compartiments récepteurs, devrait assurer une complémentarité des études menées à l'échelle nationale. L'intégration ou l'adossement au sein des systèmes d'observation (SNO, IR), permettrait grâce à un suivi haute fréquence des paramètres abiotiques (hydrologie, physico-chimie, température...), d'approfondir la relation entre le devenir spatio-temporel des contaminants d'intérêt majeurs pour la santé, (marqueurs de l'antibiorésistance, perturbateurs endocriniens, réservoirs ou vecteurs d'agents pathogènes...) et l'environnement. Les IR ou les zones ateliers forment ainsi un vaste réseau inter-organismes de recherche interdisciplinaires sur ces problématiques qu'il convient d'utiliser dans un objectif de production standardisée des données, bancarisation des échantillons, afin d'élaborer des scénarios ou des modèles d'évaluation du risque pour la santé humaine.

## Défis logistiques et techniques

### *Mise en place d'une démarche qualité pour la fiabilité des mesures in situ en continu*

Dans un contexte de labellisation nationale et européenne des systèmes d'observations, un des défis majeurs sera la mise en place des dispositifs de maîtrise de la qualité des mesures acquises au sein des systèmes d'observation, notamment la métrologie, la traçabilité et la bancarisation des données. Un des objectifs serait de coordonner cette démarche à l'échelle nationale pour le suivi des paramètres communs (rédaction des protocoles, métrologie, calibration des sondes) en s'appuyant sur l'expérience acquise sur les sites où cette démarche a été initiée. Une démarche identique pourrait être menée sur la traçabilité des échantillons (barcoding, logiciel commun, identification nationale des collections) à l'image de ce qui est déjà menée au sein des Zones Ateliers pour l'analyse des archives sédimentaires (<https://cybercarotheque.fr/>). Ces banques géo-référencées d'échantillons, doivent constituer un patrimoine scientifique partagé, et permettre des analyses rétrospectives à une échelle de temps qui dépasse celle de la carrière des chercheurs. Il est proposé qu'une réflexion soit menée au niveau national au niveau de SIC.

Au sein des systèmes d'observation, il est proposé une démarche en plusieurs étapes, coordonnée à l'échelle nationale idéalement par un qualificateur : I) identification et diffusion des protocoles, II) rédaction de procédures qualité, III) inter-calibration et partage d'expériences. Cette démarche, pourra s'appuyer sur des démarches qualité existantes, et permettra à terme d'atteindre des standards de type C2TM, voire des standards internationaux plus exigeants comme EN ISO 17025. Le réseau NORMAN (*Network of reference laboratories, research centres and related organisations for monitoring of emerging environmental substances*) pourrait être pris comme exemple pour structurer les besoins de la communauté en terme d'harmonisation méthodologique et des mesures.

### *Bancarisation des échantillons et diffusion des données numériques à l'échelle des systèmes d'observation*

Une démarche concertée de bancarisation à l'échelle nationale, nécessite dans un premier temps d'identifier les collections déjà existantes (sols INRA, ECOFOR ONF...), de recenser voir de référencer les collections potentielles ou en cours et d'organiser, au niveau national, les lieux et conditions de stockage. Cette démarche, repose implicitement sur un partage d'expérience, une traçabilité des échantillons stockés, générant des fichiers conséquents de métadonnées qu'il faudra, à terme, harmoniser dans un souci d'interopérabilité.

La bancarisation des données numériques, à l'échelle nationale voire internationale, doit aussi être interopérable. Les pôles thématiques de données comme le pôle de Theia peuvent potentiellement fournir un accompagnement technique pour atteindre cet objectif. Par ailleurs, ces bases de

données sont aujourd'hui reconnues comme des ressources scientifiques qui peuvent être associées à un identifiant numérique (« DOI ») et décrites dans des articles de type « data paper », ce qui leur donne aussi un statut juridique (licences dont Creative Common).

Certaines communautés se sont d'ores et déjà organisées pour produire des bases de données interoperables, ou pour la bancarisation des échantillons physiques et biologiques (notamment l'attribution d'un QR code). Ainsi l'analyse des archives sédimentaires fait l'objet d'un projet inter ZA (ROZA I, II, III, avec une application Androïde dédiée Corebook (<https://cybercarotheque.fr/>). À l'échelle européenne, il existe une base de données des substances émergentes dans l'environnement (réseau NORMAN), une base de données relative à la composition des roches (portail GEOROC hébergé par le MPI à Mainz; <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>). Il est à noter l'initiative, lancée en Allemagne et aux États-Unis, pour attribuer un numéro unique à tout échantillon « environnemental » (International Geo Sample Number, ou IGSN), facilitant ainsi la traçabilité entre différentes publications (<http://www.igsn.org/>).

### Observations spatiales : continuité, implication des scientifiques en amont, nouveaux capteurs

Au cours de ces dernières années, l'utilisation des observations de télédétection spatiale, pour la caractérisation des surfaces et interfaces continentales, s'est généralisée. Les principales raisons en sont I) les progrès techniques, qui ont contribué à l'amélioration de la qualité des observations et de leur résolution spatiale, II) l'émergence de capteurs à moyenne et haute-résolution spatiales fournissant des produits à des résolutions temporelles journalières à hebdomadaires et sur le long terme III) une meilleure adéquation entre les produits fournis à la communauté scientifique, grâce à la mise en place d'équipes scientifiques interagissant avec les agences spatiales tout au long du développement des missions, IV) la création de services de distribution de données par les agences spatiales (Apeears de la NASA ou Copernicus Space Data Component Access de l'ESA) et, à l'échelle nationale par le pôle thématique inter-organisme Theia, qui a fortement contribué à la diffusion de ces données et produits dérivés au sein de la communauté scientifique SIC. On peut citer comme exemple de succès les réflectances de surface et température de brillance observées par l'imager multi-spectral MODIS et les nombreux produits dérivés (indices de végétation, albedo, évapo-transpiration...) disponibles depuis 2000, largement utilisées pour étudier les propriétés des surfaces continentales, le fonctionnement des écosystèmes et le cycle hydrologique, ou encore le contenu intégré en eau des sols, déduit des mesures de la mission de gravimétrie spatiale GRACE, qui a permis, entre autres, de quantifier la déplétion des grands aquifères terrestres entre 2002 et 2016. Dans le domaine de la Santé, on mentionnera la plus-value de ces données spatiales dans le développement de cartes de risque de transmission pour différentes maladies infectieuses, vectorielles ou non, pouvant *in fine* être diffusée auprès des acteurs de santé publique.

Cependant, des verrous concernant l'observation spatiale subsistent toujours. En premier lieu, des interrogations demeurent sur la continuité des produits fournis. Si l'avenir de nombreuses applications utilisant des images multi-spectrales et SAR en bande C semble assuré, notamment, par le programme européen Copernicus, tel n'est pas le cas pour les images SAR en bande L, uniquement fournies par la mission PALSAR-2 de l'agence spatiale japonaise et qui sont, pour l'heure, les seules permettant de détecter les inondations sous forêt ou la biomasse forestière. Le retard pris pour la mise en orbite de la mission d'altimétrie franco-indienne SARAL, puis le choix de l'ESA d'abandonner cette orbite pour les missions Sentinel-3, ont conduit à une interruption des séries temporelles de hauteur d'eau sur les continents, obtenues à partir des mesures d'ERS-2 et d'ENVISAT entre 1995 et 2010, et à leur arrêt en 2016 à la fin de la mission nominale de SARAL. En second lieu, de nombreuses variables ne sont pas mesurées par les missions satellitaires actuellement en orbite. Une plus grande implication des scientifiques dans la définition des missions spatiales, à l'instar de ce qui est fait par le CNES et la NASA dans le cadre de la mission SWOT, permettrait de mieux identifier les priorités scientifiques et, éventuellement, d'embarquer des expériences en passager, afin de tester de nouveaux types d'observation ou de nouvelles applications, pendant une durée limitée. Des missions satellitaires mises en orbite récemment, comme la constellation CYGNSS, composée de 8 petits satellites effectuant des mesures de réflectométrie GNSS, qui est la première de ce type, les futures missions BIOMASS, qui fournira, dès 2020, une estimation de la hauteur des forêts et de la biomasse grâce à l'utilisation inédite de la bande P en imagerie SAR, et SWOT, qui fournira des cartes de hauteurs d'eau des hydrosystèmes continentaux, à partir de 2021, par interférométrie SAR, viendront offrir de nouvelles observables du domaine des SIC.

Un des verrous mentionnés lors de la précédente prospective concernait le changement d'échelle, c'est-à-dire la représentativité des mesures et leur adéquation aux processus à quantifier, cette adéquation étant liée à l'échantillonnage spatial et temporel. L'émergence des drones pourrait constituer une opportunité pour évaluer la représentativité des observations spatiales en offrant une échelle intermédiaire entre les observations *in situ* et les produits issus de la télédétection. Par eux-mêmes, les drones sont un moyen d'observation particulièrement adaptés pour le suivi régulier de certains paramètres des SIC sur des sites locaux ou régionaux (changement d'occupation des sols sur un ensemble de parcelles agricoles, suivi du trait de côte sur quelques dizaines de kilomètres, à des résolutions spatiales décimétrique à métrique).

Des stratégies spécifiques de validation des produits (niveaux 1, 2 et 3) doivent être envisagées. C'est le cas des estimations de température de brillance de la mission SMOS, dont la résolution spatiale est de 50 km, qui sont utilisées pour estimer l'humidité des sols ou plus encore des produits du contenu intégré en eau des sols issus de la mission GRACE, et à partir de 2018, de la mission GRACE Follow-On

(résolution spatiale de l'ordre de 200 par 200 km), qui nécessitent de disposer des mesures de l'ensemble des réservoirs hydrologiques (eau de surface, eau du sol, nappes phréatiques, neige) à cette échelle.

### **Traitement des grands jeux de données et développement d'algorithmes**

Un des enjeux liés à l'émergence des jeux de données occupant un grand volume («Big data»), lié au développement des programmes de type Copernicus de l'Union Européenne ou SWOT, concerne le stockage des observations satellitaires. Des interrogations se font jour sur le type de support physique qui permettra d'assurer un support pérenne des observations, sur le type d'informations à sauvegarder (données brutes issues du capteur occupant de grands volumes mais permettant ensuite de conserver l'intégralité de l'information dans l'optique de retraitements futurs visant à améliorer la qualité des produits dérivés ou produits de niveau supérieur de plus faible volume mais en acceptant la perte de certaines informations).

Pour compléter la liste de ces défis logistiques et techniques on mentionnera le renforcement de l'utilisation des données participatives citoyennes et des passerelles collaboratives avec le CNRS-INSHS, la mise en adéquation de la taille de l'objet d'étude et le dimensionnement des dispositifs d'observation, et le développement d'**outils miniaturisés** de type capteurs permettant l'étude *in situ* et sur le long terme de paramètres abiotiques et biotiques (i.e. traçage de bio-indicateurs, de pathogènes) dans les différents compartiments et milieux /interfaces. Les Ateliers d'Expérimentation et d'Instrumentation doivent être mis à profit pour ces développements.

## **Quel avenir pour les systèmes d'observation ?**

### **Nécessité d'assurer un futur pérenne**

La restructuration des systèmes d'observation a permis d'en assurer leur continuité et la tendance actuelle vise plutôt à l'intégration de nouvelles observations dans les SNO existants plus qu'à la création de nouveaux services. Les données satellitaires et les produits qui en sont dérivés pourraient être intégrés dans les SNO existants, à l'image des SNO AMMA-CATCH, HYBAM, OSR. Elles sont déjà au coeur des activités de systèmes d'observation non encore labellisés SIC comme le CTOH. Les données issues des observations à moyennes et hautes résolutions spatiales et temporelles sont particulièrement concernées, à l'exemple du programme Copernicus.

### **Vers une garantie de moyens (humains, équipement...)**

Les SNO reposant essentiellement sur l'activité des CNAP SCOA et d'ITA, le faible nombre de recrutements prévus au cours des 10 prochaines années ainsi que le non-renouvellement des postes d'ITA font planer des incertitudes sur les capacités de relever l'ensemble des défis liés à l'observation à long terme. Face à ce constat du déficit récurrent de moyens humains mais également pour l'équipement et le fonctionnement de ces SNO, il est souhaitable de renforcer des politiques concertées entre les universités et le CNRS (notamment au travers des OSU), de réaliser un recensement du potentiel actuel et des besoins pour les missions actuelles et à venir, de poursuivre les démarches de labellisation IR, de maintenir les dispositifs de financement récurrents des SNO et de les associer à des réseaux internationaux.

### **Pour une complémentarité SNO – pôles de données**

Aujourd'hui, il faut favoriser les synergies entre observatoires et pôle de données à l'image du pôle Theia et le domaine spatial, soutenu par les programmes de type PNTS. Cette synergie facilite les développements méthodologiques, les tests de validation des algorithmes de télédétection et contribue à une meilleure compréhension des systèmes étudiés par les observatoires, notamment dans le cadre des missions spatiales ou pour l'analyse des longues chroniques de données (jusque 45 ans).

## **RÉSUMÉ EXÉCUTIF**

**Des dispositifs d'observation instrumentés, multi-disciplinaires, multi-paramètres, et multi-partenaires (Systèmes Nationaux d'Observation, SOERE), actuellement structurés au niveau national en Infrastructures de Recherche (IR), pour, à terme, intégrer des structures européennes (eLTER), sont des outils indispensables à la communauté SIC pour traiter les questions relatives à l'impact des changements globaux sur les anthropo - écosystèmes à différentes échelles spatiales et temporelles.**



## MODÉLISATION

### RÉSUMÉ GLOBAL

La communauté des SIC se retrouve aujourd'hui dans le concept de la Zone Critique (ZC), i.e. de l'environnement terrestre où les interactions entre roche, sol, eau, air et organismes vivants régulent nos écosystèmes et ressources naturelles. Comprendre la ZC demande qu'on résume toute sa complexité physique, chimique, géologique et biologique à des relations/équations simples, mais suffisamment réalistes pour qu'on puisse calculer et prévoir l'évolution des ressources et des services qu'elle fournit mais aussi l'évolution du milieu lui-même. Les modèles de ZC se construisent par le couplage de modèles dédiés à un ou des processus (e.g. physicochimie à l'échelle moléculaire, ruissellement/transport sur versant, transferts dans les sols, dans la végétation, en rivière...), pour lesquels ils sont pour la plupart d'ores et déjà évalués. Les manières de coupler ces différents modèles posent encore des questions méthodologiques. L'objectif principal du prochain quinquennal est de combiner les différentes approches de modélisation.

### Préambule

Dans les Surfaces et Interfaces Continentales (SIC) le mot « modélisation » recouvre différents outils et méthodes. De manière générale le modèle est un moyen de représenter un ensemble d'observations que l'on souhaite mettre en relation, afin d'obtenir une estimation, à plus ou moins long terme, de l'évolution de la ZC ou extraire les paramètres pertinents régissant des lois de comportement, ou processus. Il peut prendre la forme d'un simple schéma conceptuel, de maquette, d'un ensemble d'équations aux dérivées partielles, de relations statistiques, etc. La pertinence d'un modèle peut être remise en cause à chaque nouvelle observation entraînant ainsi un processus de recherche itératif de formulation de nouvelles hypothèses, d'un nouveau modèle et son implémentation numérique pour des études d'impact et des prédictions. La plupart des modèles dont nous disposons aujourd'hui, sont souvent issus de simplification des équations de conservation, pour représenter un processus, la dynamique d'un réservoir, d'un agent, et leur agrégation constitue une démarche de modélisation à part entière qui requerra dans les prochaines années toute l'attention de notre communauté.

### Les Enjeux de la ZC ou Les enjeux de la modélisation

Les outils de modélisation permettent de répondre aux questions que la société nous pose en termes de prédiction, de caractérisation des risques, de l'empreinte de l'homme sur les milieux de la ZC, sur les ressources naturelles et/ou sur le climat. L'un des enjeux de la modélisation est donc de proposer les outils qui pourront adresser les grands enjeux de société associés au SIC, en particulier ceux guidés par les Objectifs du Développement Durable.

Parmi les thèmes prioritaires le premier concerne la vulnérabilité des ressources face aux changements globaux. En effet, les ressources en eau, comme les ressources en sol sont soumises à de fortes pressions et susceptibles d'être impactées de manières importantes, voire irréversibles, leurs qualités. Cela inclut l'impact de l'aménagement des territoires sur les ressources en eau et en sol, l'impact des milieux urbains et des ouvrages, le rôle du vivant sur la dynamique de la ZC, l'impact des changements climatiques, l'identification et caractérisation des « Hot moments » et des « Hot spots », jouant un rôle crucial dans la dynamique de la ZC. Ces enjeux font clairement apparaître le besoin

de couplage de processus au sein de la ZC (e.g. couplage entre réservoirs, processus biotique/abiotique, science physique et science des sociétés...) d'une part mais aussi avec les autres compartiments du système terre que sont l'atmosphère, l'océan, la cryosphère et la lithosphère. Ils positionnent les SIC comme une brique à part entière du système terre.

Le cadre du modèle intégré du système terre permettra de mieux appréhender conditions aux limites, de permettre le développement d'outils et de forçages adaptés et éventuellement de couplages dynamiques. Enfin, les modèles de ZC constituent une brique incontournable des modèles du système terre vis-à-vis des grands cycles de l'eau, de l'énergie, du carbone, de l'azote, des sédiments...). La ZC est en effet très « réactive » vis-à-vis de ces différents flux. Si le contrôle du bilan d'énergie à la surface a permis de fiabiliser les prédictions de réchauffement climatique au cours des dernières décennies, la prise en compte explicite des autres flux reste encore fragile et partielle. La construction d'un modèle de ZC pour un modèle intégré du système terre est l'un des enjeux qui est adressé aujourd'hui à la communauté SIC et pour lequel des initiatives internationales d'envergure sont déjà engagées (TerrSysMP, OLAM Soil project, WRF-hydro).

### État de l'art et verrous scientifiques et techniques

Au cours des précédents exercices, les efforts de modélisation ont permis de nombreuses avancées impliquant à la fois des développements de modèles conceptuels simples et des codes de calculs numériques à haute performance. Il reste cependant encore une partie de la communauté SIC qui utilise peu ou pas la modélisation, ce qui apparaît clairement lorsqu'on analyse les projets soumis dans EC2CO : dans les projets soumis aux Actions thématiques MicrobiEN et ECODYN on trouve très peu de projets qui ont une approche de modélisation. Les interactions entre processus biotiques/abiotiques, qui sont souvent abordées par cette partie de la communauté SIC, sont peu prises en compte dans les modèles. Un effort serait à faire pour aller dans ce sens. Le manque de modèle de ZC intégré est en partie lié à la complexité extrême du système à modéliser :

- La zone critique est un système non-borné temporelle. Ce qui signifie que l'état actuel de la zone critique est le résultat de processus à différentes échelles de temps (allant des dizaines de millions d'années, à l'échelle horaire, jusqu'à la nano seconde).
- La zone critique présente une variabilité spatiale infiniment plus grande que l'atmosphère ou les océans, qui sont des milieux géophysiques relativement homogènes. Chaque parcelle de la zone critique présente un état hérité de la tectonique, de l'histoire du couvert végétal, des fluctuations climatiques et de leur amplitude, de l'ensoleillement, des processus érosifs, de l'historique de l'impact anthropique.
- Enfin, le vivant intervient à tous les étages et échelles de

la zone critique, et sa mise en équation est un défi majeur pour la construction de modèles, quelle que soit l'échelle spatiale et temporelle.

Chacun de ces points impose des défis à la communauté des SIC. Les deux premiers concernent d'une part la difficulté de caractériser la ZC, sa variabilité spatiale à un instant donné et d'autre part la question du transfert d'échelle pour un grand nombre de processus. Le besoin de données spatialisées pour documenter les caractéristiques physiques des milieux étudiés est énorme et nécessite la mise en place d'outils pour favoriser la synergie entre observation et modélisation. La constitution de jeux de données de référence pour la ZC (cartographie globale dans la ZC des stocks d'eau, des stocks de CO<sub>2</sub>, caractéristiques des aquifères, des sols) pour définir des conditions initiales et contraindre par assimilation les trajectoires d'évolution de la ZC, comme le sont les ré-analyses et les reconstitutions climatiques pour les modèles climatiques, reste certainement l'un des enjeux des prochaines années pour la communauté internationale. Les produits de la télédétection spatiale associés à la constitution de bases de données sol offrent d'ores et déjà des opportunités pour construire ces cartographies. Les interactions d'échelle dans la ZC sont nombreuses et nécessitent d'une part le développement d'outils de modélisation aux différentes échelles depuis celle des molécules jusqu'à celle du continent. Du fait des échelles associées aux différents processus, des comportements des organismes vivants, voire des sociétés, les couplages biotiques-abiotiques pourront « intelligemment » s'appuyer sur les nombreuses approches de modélisation qui ont été explorées dans la communauté SIC (modèle à base physique, mono processus ou couplés, modèles stochastiques, modèles à base d'agent). En particulier, l'introduction de modèle stochastique et/ou à base d'agent au sein des modèles physiques de ZC permettra d'introduire la notion de variabilité qui reste très difficile à contraindre par des données de terrain.

### Synergie observation/modélisation

La modélisation des SIC est entrée dans un 4<sup>e</sup> paradigme, celui de la « science intensive de la donnée ». C'est-à-dire, qu'après l'empirisme, la description théorique, et la modélisation numérique distribuée, un nouveau paradigme nous est ouvert pour lequel la production des données dépasse nos capacités à les analyser sans outils numériques adaptés, sans modèle permettant de les assimiler. Cette disponibilité de données, à la fois offre l'opportunité de construire des forçages (ex. précipitation, biomasse...) des cartographies de paramètres pour la ZC (ex. les propriétés hydrodynamiques du sol) et des produits d'évaluation pour les modèles numériques (ex. évapotranspiration, chronique de débit, géochimique...), mais pose aussi des défis vis-à-vis de l'assimilation, des outils d'évaluation, et de leur accessibilité et de leur interpolation. Ces défis nécessitent ainsi une collaboration étroite entre modélisateurs et observateurs. Les données issues de la télédétection spatiale en lien avec le cycle hydrologique et la végétation sont déjà nombreuses

et suscitent des efforts importants des agences Spatiales pour le développement de nouvelles missions (SWOT, ECOSTRESS, TRISHNA). Ces données ont l'avantage d'être disponibles à l'échelle mondiale (à des échelles spatiales de plus en plus fines) et de manière répétée dans le temps. Toutefois elles sont encore largement sous-exploitées et une attention particulière sera portée sur leur utilisation dans le prochain quinquennal. En parallèle, les mesures obtenus sur différents sites et observatoires constituent des bases de données exploitable pour des expériences de modélisation à différentes échelles spatiales. Dans ce sens, l'infrastructure de recherche OZCAR (Observatoire de la Zone Critique: Application et Recherche) n'est pas le lieu que de l'observation, mais ambitionne aussi de renforcer la synergie Observation - Modélisation en permettant: de faciliter l'accès à des données provenant de sources différentes et donc la mise en œuvre et la validation de simulations; de permettre en retour l'archivage de produits issus de la modélisation et de champs de forçages et ainsi faciliter les programmes d'inter-comparaison de modèle; d'archiver des résultats de simulation de référence pour lesquelles l'analyse des résultats pourrait impliquer une large communauté à l'instar des simulations CMIP, CORDEX pour le climat; de susciter le développement d'outils de couplage, d'assimilation, et de fouille de données. Au cours du prochain quinquennal une attention particulière devra être portée par la communauté des modélisateurs des SIC à la mise en place de cette dynamique au sein d'OZCAR.

Au cours des précédents exercices des avancées ont été réalisées pour ce qui concerne l'assimilation dynamique de données au sein des modèles de ZC. La question de l'intégration d'observations dans les modèles présente plusieurs aspects: (1) l'intégration dynamique dans les simulations, d'observations satellitaires de variables biogéophysiques par assimilation de données, (2) l'utilisation de données *in situ* ou satellitaires pour la validation des modèles, (3) la cartographie des paramètres des modèles (ex. les propriétés et l'occupation du sol).

L'assimilation de données est la méthode numérique qui permet d'intégrer ces importants volumes d'observations dans les modèles de ZC. Ainsi, des systèmes d'assimilation de données adaptés aux surfaces continentales ont été développés dans la plateforme de modélisation SURFEX. Le but est de contraindre le modèle de surface ISBA (Interaction-Sol-Biosphère-Atmosphère) à partir d'observations satellitaires telles que l'humidité superficielle du sol et l'indice de surface foliaire (LAI pour « Leaf Area Index »). Ces systèmes ont été évalués et validés à partir d'observations satellitaires (évapotranspiration, production primaire brute) et de mesures *in situ* indépendantes (humidité du sol, débit des rivières, rendement agricole). Ils sont désormais assez matures pour servir d'outils d'aide à la décision dans des applications telles que le suivi des sécheresses éda- phiques et agricoles. L'effort entrepris pour faire converger les définitions conceptuelles des variables de télédétection et celles des modèles de surface (FAPAR, LAI, humidité du sol) a également mis à jour certaines limitations dans l'uti-

lisation de ces observations dérivées de la télédétection. Cette démarche pourra être poursuivie afin de préciser les prévisions des modèles de ZC en termes de bilan d'eau de carbone, d'azote et permettre le développement d'outils d'aide à la décision.

Enfin, l'évaluation des modèles se fait en général par comparaison des variables d'états du modèle avec des observations de la même variable mais aussi souvent par des proxys de cette variable (hauteur d'eau pour débit). Ainsi un effort reste à faire pour que les modèles de ZCs puissent représenter non pas ces variables dérivées de la télédétection mais directement les signaux mesurés (Température de brillance, coefficient de rétrodiffusion, conductivité électrique, hauteur d'eau) télédétections pour limiter la perte d'information. Le développement de ces « démonstrateurs » d'instruments de mesure pourra aussi être développé dans le cadre de la dynamique d'OZCAR.

La profondeur temporelle d'observations satellitaires de variables biogéophysiques telle que le LAI mais aussi la résolution spatiale plus fine de nouveaux produits d'occupation des sols permet d'entreprendre un nouveau travail de cartographie des paramètres des modèles. De nouveaux paramètres, liés par exemple à la cartographie des zones irriguées (et du mode d'irrigation) peuvent être mis en place afin de mieux représenter l'impact anthropique dans le cycle hydrologique terrestre. Un soutien sous forme de mises en réseau des sites d'observation est déjà en cours. Il permet échanges et entraides au niveau national sur les méthodes d'observation. Peut-on réfléchir à des mises en réseau de certains sites spécifiques pour le développement de la modélisation? Les exercices d'intercomparaison de codes sur des données réelles peuvent constituer une première étape intéressante dans cette direction.

## Changement d'échelles dans la ZC

Depuis les échelles moléculaires aux échelles géologiques, les gammes d'échelles spatiales et temporelles pour les SIC couvrent ~ 15 ordres de grandeur. Les modèles numériques que nous utilisons ne pouvant en couvrir bien plus que 4, nous sommes donc rendus pour un problème donné à considérer les échelles supérieures comme un forçage issu d'observation ou de modèle d'échelle supérieure et de considérer les échelles inférieures comme des paramétrisations sous-mailles. Ce constat doit mener à des travaux en collaboration entre les modèles aux différentes échelles, les uns nourrissant les autres en proposant des lois d'agrégation spatiale des processus, d'homogénéisation, et des paramètres agrégés et à l'inverse les uns proposant des scénarios et des forçages respectant les comportements de plus grandes échelles. Ce verrou, déjà mentionné dans le précédent exercice de prospective, reste d'actualité.

Aux échelles moléculaires (fs-ns et pm-nm), les approches *ab initio*, de modélisation ou de dynamique moléculaire, permettent d'accéder à deux grands types d'information. Premièrement, ces approches visent à la compréhension et à la prédiction des processus physiques-chimiques fondamentaux opérant aux petites échelles et contrôlant les interactions entre des isotopes/éléments/molécules d'une part et l'ensemble des constituants fluides, minéraux, organiques et vivants des formations continentales superficielles d'autre part. Deuxièmement, à ces échelles moléculaires, la modélisation doit également permettre de reproduire les signaux, souvent complexes, issus de techniques expérimentales (e.g. spectroscopies) visant à caractériser ces interactions. Un enjeu essentiel pour l'approche modélisatrice apparaît lié au nécessaire renforcement du dialogue entre modélisateurs, expérimentateurs et observateurs d'objets naturels. La confrontation des simulations avec les résultats expérimentaux est primordiale pour valider ou optimiser les jeux de paramètres computationnels (champs de forces, bases de données thermodynamiques *sensu lato*...) et en tester la versatilité. Cette étape constitue un préalable indispensable à la prédiction ou à l'exploration de conditions inaccessibles expérimentalement. L'intégration des processus moléculaires dans la compréhension à l'échelle mésoscopique des propriétés physico-chimiques de colloïdes naturels ou d'analogues modèles (micro-organismes, (nano)particules, matière colloïdale) apparaît également comme un enjeu majeur pour les prochaines années. Une compréhension approfondie de la physico-chimie des (bio) interfaces est ainsi nécessaire pour cerner leurs réactivités et/ou leur devenir dans des contextes très divers. Les formalismes théoriques sont très souvent cantonnés à des approches thermodynamiques réductrices et peu réalistes, en particulier pour les transferts d'éléments impliquant des interfaces biologiques et pour la capture fine des processus de toxicité de contaminants traces métalliques, organiques ou nanoparticulaires. Un réel effort de conceptualisation (bio)physique des processus doit être encouragé pour dépasser la nature spécifique des objets et offrir un cadre in-

terprétatif et prédictif général de comportements ou d'interactions. La transposition de ces processus élémentaires à de plus grandes échelles (temps et espace), par exemple pour la modélisation du transfert réactif dans une nappe souterraine ou un sol partiellement saturé, représente un autre enjeu qui nécessite le couplage des différents modèles numériques. Ceci permettrait de conforter les bases mécanistes de ces modélisations et d'en assurer ainsi la versatilité. L'amélioration de « la description à l'échelle du millimètre ou de centimètre (celle de l'homogénéisation) » reste cependant à développer.

Concernant les échelles régionales ou globales, les modèles de la ZC sont aussi connectés à des modèles océaniques, des modèles de glace et des modèles climatiques. À titre d'exemple, on peut citer l'impact de l'hydrologie continentale (apports d'eau douce) sur l'anoxie des eaux de méditerranée ou l'impact d'une fonte accélérée du Groenland sur la mousson tropicale et les modifications hydrologiques induites sur l'humidité des sols en Afrique tropicale. Les modèles de systèmes terre ont ainsi besoin des contributions des SIC. De même, la modélisation de la ZC pour les longues échelles de temps ( $10^3$  à  $10^6$  années) permet de représenter l'évolution de la ZC au cours des millénaires et ainsi proposer des structures géologiques et lithologiques cohérentes pour les modèles de ZC sur les périodes contemporaines. L'utilisation de modèle géomorphologique en lien avec l'évolution du climat sur les mêmes périodes offre des axes de développement à considérer pour cartographier la géométrie et les propriétés en particulier des réservoirs profonds.

## Modélisation du système terre & changement climatique

Les couplages entre cryosphère et hydrosphère sont sous-jacents à des enjeux scientifiques majeurs tant pour ce qui concerne les bilans de masse des glaciers et des calottes que le fonctionnement des bassins hydro-glaciaires. Les enjeux de modélisation associés sont une opportunité pour le prochain exercice quinquennal. La modélisation couplée des grands cycles H<sub>2</sub>O/C/N présente aussi des enjeux scientifiques majeurs que ce soit pour comprendre et prédire les puits et les sources continentales des gaz à effet de serre, que pour prédire l'adaptation des écosystèmes aux changements globaux en cours, ou encore pour doter les décideurs d'outils performants pour une gestion durable des territoires (aménagement, prédiction de rendement agricole, prévention des risques en particulier hydrologique) Beaucoup d'avancées ont été faites concernant le carbone ces dernières années mais de grandes incertitudes sont encore un frein majeur à une compréhension fine du système. Un effort important pour coupler les différents cycles biogéochimiques (carbone, azote, phosphore, etc.) au sein de nos modèles doit être une priorité pour les années à venir, notamment au regard des estimations souvent revues à la baisse des capacités de stockages de carbone des écosystèmes lorsque l'on passe d'un modèle sans azote explicite à

un modèle avec représentation explicite du cycle de l'azote et de son impact sur le carbone.

Les environnements côtiers sont des environnements sensibles, souvent urbanisés et présentant des enjeux écologiques et économiques forts. Ils sont vulnérables à l'élévation du niveau de la mer, mais également à l'évolution du régime des précipitations et des usages des sols dans les bassins versants. La modélisation du continuum hydrodynamique fleuves-estuaire-océan impose deux conditions que l'évolution récente et progressive de la modélisation numérique permet désormais de prendre en compte, y compris dans des configurations réalistes : d'une part la représentation du continuum d'échelles et d'autre part l'influence de l'aval vers l'amont. Cette dernière se produit à très haute-fréquence (marée, houle) ainsi qu'aux échelles longues (variations climatiques du niveau de la mer). Le développement de méthodes numériques sophistiquées (e.g. subcycling pour les schémas temporels), de discrétisations hybrides, de grilles adaptatives ou très fortement variables dans le cas de modélisation structurée ou non, ou de méthodes d'imbrication, est incorporé dans les quelques codes de circulation côtière et estuarienne utilisés dans la communauté française. Cette diversité numérique reflète en grande partie les exigences de développement imposées par les différents sites d'étude et est, à ce titre, à la fois inévitable et stimulante. Ces dernières années ont vu se développer des approches de modélisation «éco-géomorphologique», qui peuvent apporter des réponses quant aux évolutions physiques du système «estuaire-marais», en intégrant l'interaction avec la végétation, qui est fondamentale dans le processus d'évolution des zones latérales. Des exercices d'intercomparaison, des plateformes ou groupes d'échange (à l'instar, par exemple, de l'initiative COMODO pour la modélisation océanique) doivent en parallèle être proposés pour consolider les échanges entre groupes de développeurs/utilisateurs. La nécessaire quantification des incertitudes sur les simulations est désormais envisageable grâce aux développements théoriques sur les méthodes ensemblistes et la modélisation probabiliste et grâce à la disponibilité de moyens de calcul et d'archivage de plus en plus puissants.

### Priorités pour les années à venir

Il semble primordial de maintenir le savoir-faire technique en modélisation au sein des équipes de recherche dans un contexte de technicité complexe et multiple, de l'adaptation aux évolutions des moyens de calcul et d'accès aux observations, de l'innovation en termes de visualisation et d'extraction des informations dans des archives de simulations de plus en plus grandes. L'accueil d'étudiants (thèse, stage) dans des conditions confortables ne peut se faire qu'avec une politique de recrutement ambitieuse d'ingénieurs dans les laboratoires par le CNRS et les organismes de recherche associés.

Il existe un fort besoin de promouvoir le dialogue entre observateurs/expérimentateurs/preneurs de décision, informaticien/ingénieur système et modélisateurs dans les SIC. Il faudra observer les paramètres et les échelles les plus pertinentes pour les modèles, et associer les modélisateurs au design expérimental en amont des mises en places des systèmes d'observation. En parallèle, il faudra réinjecter de manière pertinente les résultats de la modélisation dans la définition de stratégies d'observation et d'échantillonnage. Il faudra également renforcer la communication entre modélisateurs, en mettant l'accent sur la cohérence des résultats produits par des modèles décrivant des processus similaires, avec des schémas conceptuels différents. En intégrant cette analyse à différentes échelles spatiales, nous pourrions alors identifier les simplifications possibles pour représenter la complexité des mécanismes mis en jeu à toutes ces échelles. Cela nous ramènera inévitablement à la question de l'identification des données nécessaires (à minima) pour des modèles dans un emboîtement d'échelle allant du microscopique au système-terre.

Une démocratisation des outils et concepts de modélisation semble aujourd'hui primordiale pour que la modélisation puisse devenir un vrai outil d'intégration dans les SIC. Si la création de postes C/EC en modélisation semble évidente, il est également important d'intégrer la modélisation numérique dans les programmes de License/Master, dans l'offre de formation permanente, et par des soutiens aux colloques. Cette formation pourrait aussi s'adresser, par exemple sous la forme d'ateliers dédiés, à une partie de la communauté SIC (biologistes, écotoxicologues) pour les encourager à intégrer davantage des approches de modélisation et prendre en compte les compartiments biotiques dans les modèles.

Des séries de données obtenues à long terme sont indispensables et la pérennisation de sites d'observations et/ou expérimentaux à l'échelle de la décennie est également un enjeu majeur pour la pertinence des modèles développés dans nos laboratoires de recherches. Le recensement et la mise en commun des modèles développés par la communauté SIC *via* des portails unifiés (ex. l'IR Système Terre, incluant le pôle Théia) semble aussi nécessaire pour développer l'usage de la modélisation. Une réflexion sur l'accès aux moyens de calculs régionaux et nationaux, sur la gestion des



énormes quantités de données générées par certains modèles, leur partage et diffusion vers la communauté la plus large possible, ainsi que leur post-traitement doit aussi être menée. Néanmoins, les modèles distribués sont de plus en plus gourmands en données. Pourra-t-on renseigner un jour les modèles à base physique hyper résolu ? Comment se donne-t-on les moyens de le faire ? D'autre part les données distribuées sont de plus en plus nombreuses que ce soit par la mise en place de réseaux de mesures (par les scientifiques ou par la société civile (données smartphone)), ou les données satellites (SWOT, GRACE, SMOS, SMAP, IRT). Cela pose la question de comment prendre en compte cette problématique du « Big Data » qui nous propose des données en nombre, certes distribuées mais pas toujours de manière uniforme dans le temps et dans l'espace, pour alimenter et/ou évaluer les modèles.

TABLEAU. ÉLÉMENTS DE LA PROSPECTIVE MODÉLISATION ET LES ODD AUXQUELS ILS VONT RÉPONDRE.

PROSPECTIVE - OBJETS MODÉLISÉS	ODD
Qualité de l'eau et des sols ; services écosystémiques	#3 Bonne santé et bien être
Transport contaminants nappes	#6 Eau propre et assainissement
Agro dynamique des biofuels ; impactes des énergies renouvelables	#7 Énergie propre et d'un cout abordable
Services écosystémiques	#8 Travail décent et croissance économique
Impactes ressources renouvelables	#9 Industrie, innovation et infrastructures
Qualité de sols et des eaux urbains	#11 Villes et communautés durables
Fonctionnement des sols	#12 Consommation et productions durables
Rôle de la ZC dans le changement climatique	#13 Mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques
Biodiversité côtier ; Évolution ressources halieutiques ; dynamique des contaminants	#14 Vie aquatique
Biodiversité terrestre ; désertification	#15 Vie terrestre

### RÉSUMÉ EXÉCUTIF

**Dans un contexte de changement globale et climatique, nous devons développer et mettre en œuvre des modèles du système Terre afin de prédire les risques environnementaux, et de conseiller les acteurs politiques sur une gestion durable de notre environnement. La diversité et complexité de l'écosphère continentale demande une synergie entre modélisateurs, observateurs et expérimentateurs afin de représenter dans nos modèles numériques, les processus physiques, chimiques et biologiques, des échelles moléculaires aux échelles géologiques.**



# CYCLES LONGS – CYCLES COURTS

## RÉSUMÉ GLOBAL

**La zone critique emmagasine les ressources naturelles essentielles au développement durable des sociétés humaines. Elle s'est formée et a évolué sur des échelles de temps géologiques, et est impactée par l'activité humaine sur des échelles séculaires à millénaires. La zone critique peut évoluer aussi rapidement sous l'effet d'événements extrêmes liés aux forçages climatiques, anthropiques, biologiques et telluriques. Comprendre et prédire la dynamique complexe qui résulte de ces forçages exige davantage d'interactions des communautés SIC, TS et OA et l'intégration des couplages avec le vivant. L'étude de la dynamique passée de la zone critique aux échelles séculaires et millénaires, et la prédiction de la dynamique future dans un contexte de changement global sont des axes prioritaires à soutenir.**

## CONTEXTE SCIENTIFIQUE, TECHNIQUE ET SOCIÉTAL, LES ENJEUX

La perception et la compréhension des cycles longs et des cycles courts par nos communautés dépendent au premier ordre des échelles spatiales et temporelles auxquelles sont étudiées les différentes composantes des surfaces et interfaces continentales (géologiques, géomorphologiques, biologiques, chimiques et hydrologiques) qui sous-tendent et intègrent des échelles de temps et d'espace très différentes. L'échelle des temps courts ( $10^2$  ans à la seconde) est celle de l'anthropocène et des processus bio-géo-hydrologiques élémentaires. C'est aussi l'échelle des observatoires (type bassin versant) qui intègrent des séries de mesures directes des variables physico-chimiques et biologiques caractéristiques de ces systèmes. C'est à cette échelle que la communauté SIC travaille principalement, en lien de plus en plus étroit avec la communauté OA.

L'échelle des temps longs ( $10^4$  à  $10^7$  ans) intègre les grandes fluctuations du climat de la terre (ex., cycles glaciaire - interglaciaires). C'est l'échelle de la communauté Terre Solide étudiant les processus géologiques régissant les cycles des éléments, la formation des paysages et les enregistrements sédimentaires souvent parcellaires pour lesquels l'enjeu de la datation est central. À ces échelles, une problématique émergente est d'évaluer la contribution du vivant dans la dynamique géologique pour laquelle la communauté SIC peut offrir une approche nouvelle.

Entre ces deux extrêmes temporels, les études aux méso-échelles ( $10^2$  à  $10^3$  ans) constituent un réel défi scientifique car elles articulent une grande partie des processus et rétroactions propres aux temps longs et courts. Ce sont les échelles de l'émergence des civilisations et de la coévolution de la Zone Critique (ZC) et des sociétés dont les archives

essentielles doivent être encore très largement collectées et analysées. Les méso-échelles correspondent aussi à des enjeux sociétaux majeurs de prédiction des dynamiques futures pour lesquelles les modèles holistiques de la ZC, intégrant la globalité des composantes géologiques, hydrologiques, atmosphériques et biologiques, n'existent pas encore.

Enfin, transverse à l'ensemble des échelles de temps, un autre défi est de quantifier et modéliser l'impact des événements extrêmes (hydro-climatiques, telluriques, anthropiques) sur la dynamique à court et moyen terme de la ZC.

## ÉTAT DE L'ART ET VERROUS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

### État de l'art : questions scientifiques clés

#### *Interactions entre les échelles de temps*

Les cycles longs géologiques (plusieurs millions d'années) ont pré-conditionné la structure (ex., épaisseurs altérées, géométrie du réseau de fracture...) et la composition (ex., minéralogie, type de sol...) de la ZC. Cet héritage détermine le fonctionnement actuel de la ZC et les processus biologiques, hydrologiques, géochimiques et géomorphologiques qui s'y déroulent et interagissent. Dans ce contexte, deux grands verrous apparaissent. Le premier est d'estimer l'état dynamique long-terme de la ZC (stationnaire ou transitoire) dans des contextes naturels ou anthropiques. C'est une étape difficile mais essentielle pour mieux comprendre les dynamiques actuelles et leurs vitesses d'évolution. Les approches géochimiques dédiées à l'altération et l'érosion des paysages à différentes échelles de temps s'avèrent ici essentielles. Le second verrou est la caractérisation en 3 di-

mensions (topographie, en profondeur et horizontalement) de la ZC et de son hétérogénéité spatiale introduite par le pré-conditionnement long-terme qui contrôle la réactivité des milieux à l'échelle des paysages. L'imagerie géophysique de surface et subsurface joue ici un rôle clef.

À l'inverse, l'extrapolation des processus spécifiques des cycles courts aux temps longs est compliquée par les différences potentielles d'amplitude et de fréquence des variables mesurables à ces différentes échelles. Le transfert d'échelle au cœur des modélisations est nécessaire pour décrire les processus de premier ordre régissant les cycles longs. Mais, quelles limites se fixe-t-on dans la simplification des processus, pour caractériser et reconstituer de manière réaliste les grands cycles géochimiques et sédimentaires, l'évolution des reliefs, des paléo-végétations et du vivant. Le caractère stochastique des forçages hydrologiques, telluriques et biologiques de la zone ZC doit être pris en compte dans le changement d'échelle temporelle afin de capturer des effets de non-linéarité, liés par exemple à des seuils (connectivité hydrologique, érosion, destruction du vivant...). Cette approche permet aussi de caractériser l'effet relatif d'événements de différente intensité sur le signal long-terme qui reste pour de nombreux processus de la ZC très mal connu.

### **Conséquences des événements extrêmes sur la dynamique long-terme**

L'analyse du passé, parfois très lointain, est essentielle pour étudier la fréquence et l'impact de différents événements extrêmes (crues, cyclones, séismes, éruptions volcaniques...). Les transitions climatiques rapides dans le passé (ex., transition interglaciaire-glaciaire) constituent par exemple des « hots moments » pour comprendre la dynamique et la réponse de la ZC à des variations de fréquence et d'intensité des événements extrêmes. Dans ce contexte, les enregistrements sédimentaires lacustres offrent une résolution temporelle fine, ainsi qu'une diversité de proxy toujours plus riche permettant de quantifier la nature, la fréquence des extrêmes et d'évaluer la réponse des éco-géo-systèmes. Le caractère intégrateur des enregistrements à l'échelle du bassin versant peut cependant limiter leur capacité à contraindre les dynamiques spatiales des systèmes naturels ou anthropiques. Le développement de nouveaux types de marqueurs *in situ*, et l'inversion des enregistrements sédimentaires *via* la modélisation numérique spatialisée des paysages offrent des pistes prometteuses.

Dans ce contexte, l'analyse des événements extrêmes doit permettre de mieux comprendre leurs effets sur la dynamique aux méso-échelles et temps longs de la ZC, et apporter des réponses aux questions suivantes. Existe-t-il des systèmes naturels pour lesquels les événements extrêmes constituent un stress constitutif et, les approches conceptuelles actuelles basées sur une approche continue sont-elles adaptées pour en analyser finement les effets? Dans quelles conditions un événement extrême naturel ou anthropique (ex., pollutions flash, extinctions massives, dé-

forestation...) se traduit-il par un basculement rapide de l'état de la ZC (ex., érosion massive des sols, relargage de polluants accumulés...)? L'étude des couplages entre géosphère, hydrosphère et biosphère dans le contexte spécifique de ces crises, doit permettre d'avancer sur ces questions tout en répondant à des enjeux socio-environnementaux majeurs.

### **Rôle du vivant sur la dynamique long terme de la zone critique**

L'activité biologique sous toutes ses formes joue un rôle important dans les processus de surface et d'interface de la ZC. Pour autant, l'analyse et la compréhension fine des modalités et principes des interactions bio- hydrogéochimiques et de leurs processus élémentaires sont encore très parcellaires et demandent davantage d'interactions entre les géosciences et la biologie aux frontières de ces disciplines. Nous manquons encore de connaissances de base sur les échelles temporelles de ces interactions et sur les temps de réponse et de résilience des éco- biosystèmes à la suite d'un stress anthropique et/ou climatique, voire tectonique. Par exemple, la connaissance des interactions et rétroactions biotique - abiotique et de leur impact sur les cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote, et du silicium dans les sols aux échelles de temps courts à très courts (jour/semaine à pluri-mensuelle) et aux méso-échelles (séculaire à millénaire) est encore très limitée.

Au delà de la description et la quantification des processus physico-chimiques et biologiques et leurs interactions et rétroactions au sein de la ZC, une compréhension intégrée de leur dynamique nécessite de les caractériser et les articuler aux méso-échelles temporelles étant donné que l'évolution long terme (> 1000 ans) de nombreux systèmes naturels peut être conditionnée par des processus opérant sur de très petites échelles de temps (la seconde) et d'espace (<1m).

### **Dynamique de la zone critique aux méso-échelles (séculaires à millénaires)**

Les méso-échelles émergent comme un enjeu majeur scientifique et sociétal déjà partiellement reconnu lors de la précédente prospective. La plupart des couplages et rétroactions entre la géosphère, la biosphère, l'atmosphère et l'anthroposphère sont à l'œuvre à ces échelles, et leurs forçages climatiques, tectoniques et anthropiques ne sont pas stationnaires. À ces échelles, l'analyse de la dynamique de la ZC est particulièrement complexe, d'autant que les mesures instrumentales ne couvrent que très rarement l'échelle séculaire.

Cependant, les études aux méso-échelles peuvent s'enrichir d'une vision archéologique, historique et géographique de la dynamique des milieux et des sociétés pour compléter une grande richesse d'indicateurs et bio-indicateurs environnementaux déjà disponibles. Un des enjeux aux méso-échelles, outre le volet événements extrêmes et l'étude des couplages biosphère/géosphère, est de pouvoir séparer les tendances naturelles héritées des cycles longs, et celles

introduites par la pression anthropique.

Vers le futur, les méso-échelles abordent l'horizon 2100 pour lesquelles la communauté scientifique doit répondre aux enjeux sociétaux en lien avec la dynamique de la ZC : évolution des ressources en eau, des services écosystémiques, dynamique des socio-écosystèmes... Pour se faire, la communauté SIC doit élargir encore plus le spectre des échelles courtes étudiées traditionnellement pour intégrer des dynamiques long-terme (ex., boucles de rétroactions géochimiques, évolution des paysages et couplages avec l'atmosphère, déformations tectoniques...), en incluant les rétroactions géosphère/biosphère, tout en abordant le couplage avec les socio-écosystèmes. La prise en compte du caractère holistique de la ZC s'avère essentielle pour prédire *via* la modélisation numérique des scénarii d'évolution de la ZC en fonction des stratégies de réponse au changement global. La déclinaison à l'échelle des territoires est aussi un enjeu majeur pour tenir compte des spécificités locales et étudier les impacts environnementaux de différentes bombes à retardement environnementales comme l'évolution rapide de la cryosphère, le devenir des barrages/reteues collinaires, le relargage des sols pollués ou le stockage souterrain à long-terme des déchets.

### Verrous technologiques et instrumentaux

#### Observations, mesures in situ et reconstructions des trajectoires passées

L'existence d'observatoires pérennes est une opportunité pour les communautés scientifiques françaises. Néanmoins, trois verrous et une menace apparaissent :

**Verrou 1 :** La difficulté à instrumenter les événements extrêmes sur le territoire national comme sur les chantiers à l'étranger, dû à l'absence d'instrument suffisamment résistant, et/ou au coût de déploiement instrumental sur site pour attendre l'événement extrême et pouvoir étudier suffisamment longtemps la réponse de l'environnement à la perturbation. Le monitoring scientifique d'événements extrêmes (cyclones, séismes...) est d'autant plus difficile à mettre en œuvre hormis dans la dimension spatiale de télé-détection satellitaire.

**Verrou 2 :** Les SNO et différents sites observatoires manquent souvent d'une profondeur temporelle de données au-delà du registre instrumental, qui pourrait être documentée par les documents historiques et par les proxy. Les observatoires n'ayant pas toujours été choisis en fonction d'un objectif de profondeur temporelle, et les liens avec les historiens et archéologues n'étant pas toujours établis, il reste difficile de construire de très longues séries temporelles (plusieurs siècles) de variables de la ZC.

**Verrou 3 :** Dans le cas spécifique de l'analyse des événements extrêmes, la construction d'un état de référence est essentielle ce qui nécessite la pérennité de l'observation.

**Menace :** la difficulté croissante à trouver les financements et les personnels pour gérer la collecte et l'archivage des données, leur gestion à long-terme et leur mise à disposition

(ex., carottes sédimentaires) peut aboutir à la perte d'une grande quantité de données.

#### Verrous géochimiques : Analytiques / géochronologiques

La communauté française dispose déjà d'outils et plateformes analytiques permettant de mener une recherche de premier plan au niveau international. Par exemple, en géochronologie, on peut souligner le rôle fondamental des laboratoires nationaux comme le Laboratoire National des Nucléides Cosmogéniques (L2NC) ou le Laboratoire de Mesure du carbone 14 (LMC14). Néanmoins, dans un contexte scientifique et technologique en perpétuelle évolution et économiquement contraint, il est fondamental d'établir une stratégie nationale permettant à la fois de maintenir et développer les outils existants, et d'identifier les manques pour les combler. Parmi les besoins exprimés par la communauté on peut noter un intérêt croissant pour la géochronologie à haute résolution avec des méthodes telles que l'OSL ou bien le  $^{14}\text{C}$  *in situ*.

Actuellement les efforts doivent porter sur le développement de nouveaux outils permettant de mieux caractériser l'état passé des surfaces continentales et en particulier les paléo-altitudes, paléo-précipitations, les paléo-environnements et l'évolution long-terme des surfaces portant des régolithes (datation, vitesses d'évolution...). La datation des morphologies des surfaces sur le temps long se heurte au problème de leur préservation/érosion et de l'incertitude intrinsèque des nombreuses méthodes nécessitant de croiser les approches. Par exemple, la reconstitution des variations de flux de matières (terrigenes et élémentaires) sur des milliers à millions d'années a progressé à partir d'archives de sols (régolithes) et sédiments, mais les proxys utilisés restent discutés et les paléo-taux d'accumulation sédimentaire ne peuvent pas être simplement interprétés comme reflétant sans équivoque la dénudation continentale.

Des difficultés (liées aux contraintes économiques?) sont apparues ces dernières années pour maintenir les capacités de développement de nouveaux traceurs géochimiques (ex : gazeux) permettant l'estimation des temps de résidence de l'eau et de ses composés biogéochimiques dans la ZC. Par conséquent, les capacités sont actuellement insuffisantes pour construire des modèles plus complexes incluant le climat et la tectonique et plusieurs traceurs isotopiques (C, Sr, Li, B, Be, Mg, Ca...).

#### Verrous télédétection – imageries géophysiques

Même si la télédétection satellitaire et l'imagerie géophysique n'offrent qu'une profondeur temporelle limitée, ces outils sont essentiels pour cartographier en 3D l'état actuel de la ZC. Ces informations sont nécessaires pour comprendre comment l'hétérogénéité spatiale de la ZC s'est développée aux cours des temps passés, tout en fournissant les conditions limites actuelles sur lesquelles les modèles numériques peuvent explorer les dynamiques futures.

Les progrès constants faits en géomatique permettent une



analyse fine des surfaces continentales et l'étude d'une grande variété de phénomènes et processus opérant à différentes échelles spatiales et temporelles. Cependant, si la communauté française dispose depuis longtemps d'un accès exceptionnel à de l'imagerie satellite haute résolution (SPOT, Pléiades) et d'une forte structuration de la communauté autour de ces données (pôles thématiques, Equipex GEOSUD...), on peut noter que l'acquisition et la diffusion de données topographiques 3D haute résolution (Modèles Numériques de Terrain, données LiDAR aéroportées) ou hyper-spectrales qui intéressent l'ensemble des communautés est particulièrement en retard par rapport à ce qu'offrent de nombreux pays. Ces données sont pourtant d'une très grande richesse pluridisciplinaire car elles permettent la cartographie du sol (marqueurs géomorphologiques, connectivité des écoulements de surface...), de la biomasse et de la bathymétrie peu profonde des eaux continentales et côtières.

### Modélisation

La modélisation est l'outil de référence pour le changement d'échelle spatial et temporel. Il existe actuellement une dichotomie dans les modèles spatialisés de la zone ZC, entre des modèles long-terme mis en oeuvre par la communauté terre solide sur l'évolution des reliefs et des grands cycles géochimiques aux hypothèses très simplificatrices (en particulier sur le volet hydrologique et vivant), et des modèles court-terme qui supposent une organisation figée des paysages (ex., érosion et transfert de matières dans les bassins versants) mais une très grande diversité de processus se traduisant par une difficulté à aborder ne serait-ce que les échelles séculaires.

Entre ces deux extrêmes, les modèles numériques spatialisés dédiés aux méso-échelles sont rares, et n'intègrent qu'un petit nombre de processus élémentaires physiques, chimiques et biologiques plus ou moins couplés, qui sont étudiés par les communautés SIC, TS et OA. Ils doivent

### Exemples d'articulations temps courts/temps longs dans la dynamique de la zone critique



Exemples de forçages intervenant sur des temps courts et longs dans la dynamique de la zone critique. Aux échelles de temps intermédiaires et longues, l'ensemble des rétroactions peut potentiellement intervenir illustrant l'interdépendance des compartiments, et la nécessité d'une approche non-cloisonnée à ces échelles de temps.

prendre en compte des processus aux cinétiques lentes (ex., formation et évolution des sols) et des forçages potentiellement rapides (ex., extrêmes météorologiques, pollutions flash...). La démarche n'est pas de complexifier les modèles, mais notre méconnaissance de la dynamique de la ZC aux échelles de temps intermédiaires et longues, se traduit par une difficulté à établir a priori les facteurs d'ordre 1 contrôlant la dynamique sans avoir explicitement modélisé les grandes boucles de rétroactions entre processus, et pris en compte le caractère stochastique et fluctuant des forçages. Des modèles plus simples pourront émerger par une démarche simplificatrice à posteriori adaptée à l'échelle spatio-temporelle du problème (ex., l'impact séculaire de la déforestation sur un bassin versant, les transferts de sédiments et d'éléments suite à un séisme ou un cyclone, le rôle des couplages bio-géomorphologiques dans la dynamique long-terme des rivières...), et validée par une comparaison entre modèles et données.

## PRIORITÉS POUR LES ANNÉES À VENIR

### Décloisonner les communautés temps courts/ temps longs

Plutôt qu'une priorité scientifique, il nous semble important d'insister en premier lieu sur la nécessité de gommer les frontières aux limites des thèmes SIC, TS et OA, et de développer ensuite l'interaction avec les sciences biologiques et les sciences sociales. Le cloisonnement actuel pénalise l'émergence d'études portant sur les méso-échelles et l'intégration des socio-éco-systèmes dans la dynamique de la ZC, et structure artificiellement la communauté française en temps longs et courts alors qu'une telle distinction n'existe pas dans d'autres pays (ex., la communauté « critical zone » aux US recouvre largement le champs TS et SIC).

### La dynamique de la zone critique aux méso-échelles

À ces échelles de temps ni longues, ni courtes, la dynamique de la ZC est complexe car elle intègre une variété de forçages et de processus opérant sur un large spectre temporel, depuis le cumul d'évènements instantanés jusqu'aux dynamiques lentes géologiques de modification du paysage. La reconstruction des dynamiques passées, et la construction de modèles numériques permettant d'aborder la simulation des dynamiques futures est une priorité.

### L'impact des événements extrêmes sur la dynamique long-terme

La détection des événements extrêmes (climatiques, tectoniques) dans les chroniques et les séries long-terme (ex., enregistrements sédimentaires) et l'analyse de leurs effets sur la dynamique des systèmes naturels sont centrales pour modéliser et prédire les trajectoires dans le futur.

### Le rôle du vivant sur la dynamique long terme de la zone critique

L'analyse et la modélisation des couplages et rétroactions biotiques - abiotiques au sein de la ZC à différentes échelles temporelles constituent des défis qui appellent le decloisonnement et le rapprochement des communautés pour innover aux frontières des géosciences et de la biologie.

## IMPLICATIONS POUR :

### Les moyens en équipement, analyses, nouvelles techniques...

#### Datation/géochimie

Le soutien aux équipements nationaux existants doit être maintenu et une stratégie long-terme doit être définie, afin d'assurer les moyens humains permettant leur fonctionnement et les investissements nécessaires aux développements méthodologiques indispensables dans le cadre d'une compétition internationale croissante. Une attention particulière doit être portée aux techniques géochronologiques à haute résolution à l'échelle de l'Holocène.

Sur les temps longs (pré-quaternaire) il est nécessaire d'accompagner et encourager des techniques d'analyses et de datation croisées/couplées multi-minéraux (oxydes, argiles) dans les sols et régolithes de la ZC. Par exemple, combiner des datations Ar-Ar, U-Pb, (U-Th)/He,  $^3\text{He}/^4\text{He}$  sur les sols et régolithes des surfaces continentales pour contraindre la dénudation et l'évolution des surfaces continentales.

#### Données topographiques haute résolution

Il est nécessaire de mettre en place une stratégie nationale d'acquisition et de dissémination de données topographiques à haute résolution (d'origines diverses) et de formation aux outils d'acquisition et de traitement associés, et de réfléchir sur son positionnement par rapport aux pôles thématiques (Theia, ForM@Ter) ainsi qu'avec le RGE ALTI de l'IGN. L'exemple du service OpenTopography porté par la NSF peut servir de base à cette réflexion.

Il est aussi nécessaire de proposer une offre de formation doctorale plus visible et systématique accolée aux grandes plateformes et instruments nationaux (cosmonucléides et L2NC, topographie haute résolution, modélisation des processus de surface...).

### **Les chantiers et moyens d'observation (SNO, ZA, OHM...)**

La place actuelle des observatoires dans l'écosystème de la recherche est fondamentale et leurs performances sont très honorables. Notamment, l'infrastructure de recherche OZCAR répond à l'effort de structuration pluri-organisme national. Le rôle de ces observatoires peut être renforcé en croisant les échelles longues et courtes et en y intégrant l'étude du vivant et de ses interactions avec l'hydro-géosphère de la ZC. À ce titre il est important d'augmenter la profondeur temporelle des observatoires par des reconstructions (paléo)-climatiques, paléo-environnementales à haute résolution aux échelles séculaires à millénaires pour lier enregistrements instrumentaux et chroniques / séries paléo-climatiques/paléo-hydrologiques et changements environnementaux.

Même si multiplier les observatoires semblent difficile en cette période, il serait néanmoins intéressant d'identifier les manques sur des zones à très forts enjeux (notamment en lien avec la cryosphère) et potentiellement très impactés par le changement global ou les événements extrêmes (ex., observatoire « haute montagne »)

### **Les outils programmatiques**

Le décroisement entre disciplines est une priorité et peut se faire en créant des programmes CNRS-INSU TRANS/OA/SIC et une programmation de l'ANR sur la ZC intégrant les rétroactions biosphère, hydrosphère, atmosphère et géosphère, les articulations cycles courts/cycles longs et en incitant des études sur la dynamique aux méso-échelles. On peut noter aussi que les domaines des géosciences et de la biologie restent assez découplés dans les appels d'offre, ce qui nuit aux financements des projets qui ont besoin des deux aspects (car un des deux ne sera pas forcément évalué par un spécialiste du domaine). Par exemple, les biologistes et la chimie ont travaillé ensemble ces derniers 10 ans en France mais pas ou peu pour traiter des questions de recherche fondamentale autour des grands cycles biogéochimiques. Enfin, les SIC pourraient être plus soutenues par la mission interdisciplinarité du CNRS. Au delà du CNRS, il est nécessaire de renforcer les stratégies partagées inter-organismes pour pérenniser et amplifier le rôle des observatoires et des groupements de recherches autour de thèmes intégrateurs SIC/ZC, avec capacité à proposer de grands projets de recherche et consortium/réseaux de recherche au niveau européen (ex., LTER).

Outre un volet programmatique, les communautés intéressées par la dynamique de la ZC à le CNRS-INSU et le CNRS-INEE pourraient être fédérées par l'organisation d'écoles d'été annuelles de 2-3 jours où 30-40 personnes de disciplines ciblées sont réunies autour d'un thème. On peut imaginer, par exemple, une école d'été sur les questions liées à l'emboîtement des échelles (spatiales et temporelles) dans la dynamique des paysages, impliquant des géomorphologues, pédologues, écologues et hydrologues, ou une école d'été sur l'articulation modèle/données dans le cadre de la paléo-dynamique de la ZC, réunissant des modélisateurs et des spécialistes de la reconstruction des paléo-environnements. Cette approche permettrait de faire émerger plus de projets interdisciplinaires.

### **Les moyens en personnels : besoins en compétence**

Afin de dépasser le cadre des équipes qui les ont créés, le développement d'une ou plusieurs plateformes de modélisation numérique de la ZC aux méso-échelles nécessite un soutien en ITA dédiés au développement de code, à la maintenance de projets d'envergure et à la formation des utilisateurs. Des ITA dédiés au traitement, à la gestion et la distribution des données spatiales et temporelles sont essentiels pour valoriser au maximum la production des observatoires et favoriser la réutilisation des données. Enfin, le soutien au recrutement de chercheurs aux interfaces (bio-géosciences, bio-géomorphologie...) doit permettre à une nouvelle génération de chercheurs d'aller plus loin dans le décroisement des disciplines. La mobilité thématique de chercheurs devrait aussi être plus favorisée et soutenue.

### **Relation avec les Objectifs de Développement Durable (ODD)**

Pouvoir prédire la dynamique de la ZC dans l'ensemble de ses composantes géologiques, biologiques et hydrologiques en réponse aux forçages anthropiques et climatiques jusqu'en 2100 (1 génération), est un enjeu essentiel pour éclairer la société civile sur la trajectoire de la ZC, et scénariser l'impact de différentes politiques publiques locales ou globales (mitigation, remédiation, restauration). Cette capacité de prédiction holistique aux méso-échelles n'est malheureusement pas encore possible, mais la communauté scientifique n'a pas attendu la mise en oeuvre des ODD pour se mobiliser sur les questions de ressources en eau (Objectif 6), de lutte contre le changement climatique (Objectif 13) et de préservation de la vie terrestre (Objectif 15). Il est cependant important d'afficher une plus grande présence dans les organismes consultatifs, dans les médias et au travers de la formation pour sensibiliser les décideurs et la population sur l'avenir de la ZC, des ressources et de la vie qu'elle héberge.

## **Relations avec les porteurs d'enjeux : décideurs publics, collectivités, grands public...**

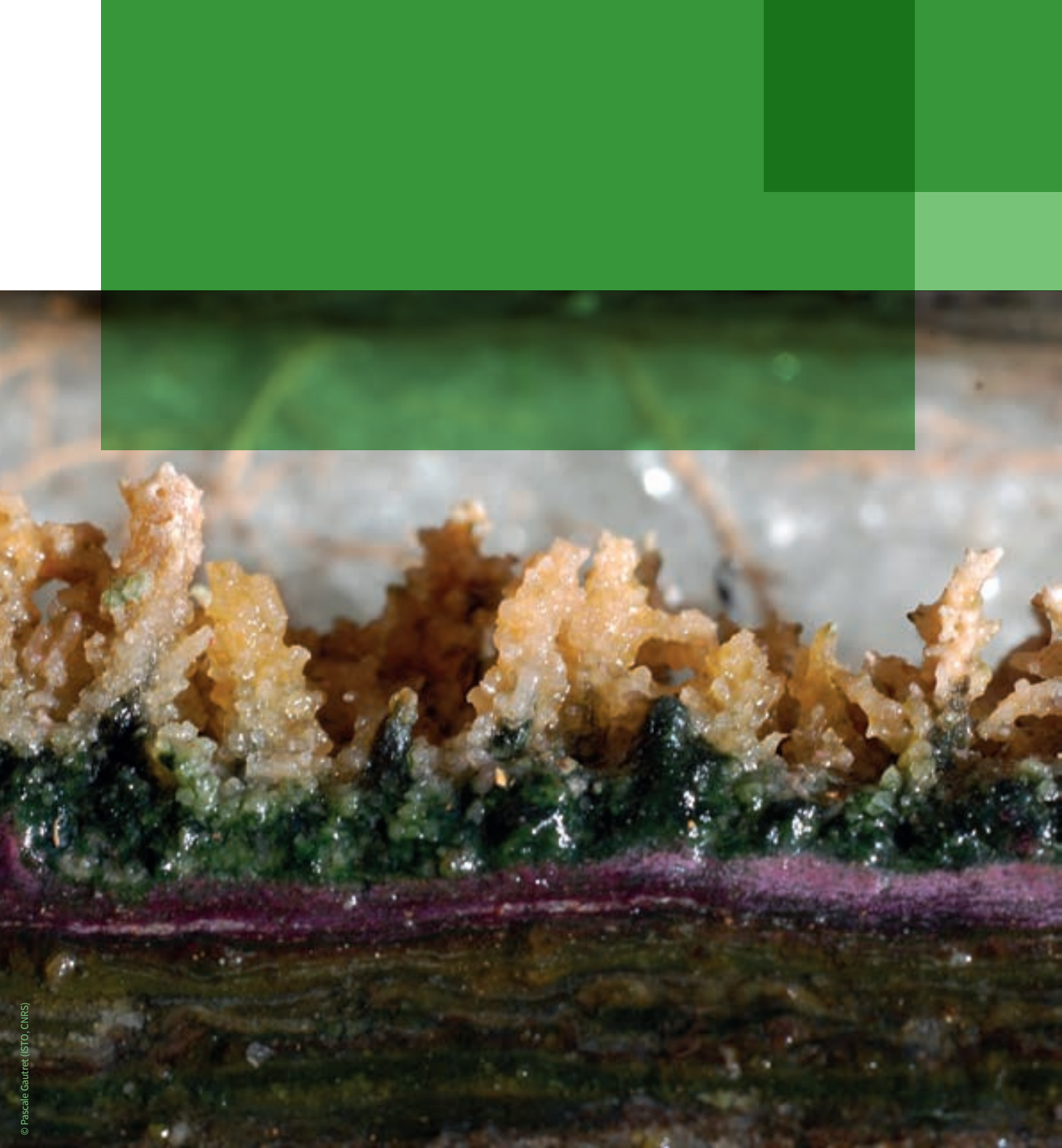
Trois types de relations sont souhaitables :

- une plus grande diffusion vers les non-spécialistes des recherches sur la ZC (motivation, résultats) afin de jouer le rôle de vigie, experte des systèmes naturels dévolu à la communauté scientifique en environnement. Cette communication, envers les plus jeunes en particulier, est essentielle pour éveiller les consciences et susciter les vocations.
- La co-construction de projets de recherche appliqués à l'échelle des territoires, déclinant des questions scientifiques fondamentales et des enjeux sociétaux.
- Développer un rôle d'expertise et d'aide à la décision sur le modèle de la communauté du climat, lorsque les outils de prédiction de la dynamique de la ZC permettront d'explorer des trajectoires à l'horizon 2100. Ce rôle est essentiel pour l'aide à la décision sur des enjeux de politique environnementale, restauration des milieux naturels ou de stockage géologique long-terme de déchets dangereux.

### **RÉSUMÉ EXÉCUTIF**

**Nous ne disposons pas encore des moyens de simuler l'évolution des ressources naturelles de la ZC (eau, biodiversité, sols...) à l'horizon de la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. Cette lacune tient à la très grande complexité des interactions entre la terre solide, l'atmosphère, l'océan, la biosphère et les sociétés qui émergent aux échelles de temps séculaires. Notre compréhension de l'impact à long-terme des événements extrêmes qui pourraient être plus fréquents et plus intenses reste aussi embryonnaire. Pour progresser, l'étude de la dynamique passée de la ZC est une piste permettant de mieux comprendre la coévolution des sociétés et des ressources naturelles. Cette connaissance pourra nourrir la construction de modèles de prédiction de l'évolution séculaire de la ZC et des ressources naturelles en fonction des choix de société.**





© Pascale Gautret (ISTO, CNRS)



# LIENS BIOTIQUE - ABIOTIQUE

## RÉSUMÉ GLOBAL

La problématique des liens entre le vivant et le non-vivant est consubstantielle à l'étude de la zone critique. Une vision intégrée du fonctionnement et de la dynamique de cette zone critique exige en effet de mieux comprendre et de mieux représenter les couplages entre le vivant, le climat et les cycles de la matière, et les modalités par lesquelles ces couplages se trouvent reconfigurés par les activités humaines. Des priorités de recherche sont identifiées afin de saisir dans un même élan les interactions entre les processus biologiques, physiques et chimiques. Il s'agit notamment de mieux intégrer la diversité du vivant et les cycles de vie dans l'étude des bilans énergétiques et hydriques des surfaces terrestres, et de la transformation et du transport des solutés (éléments et contaminants) entre les compartiments de la zone critique. Ces recherches entendent contribuer à réduire l'incertitude de nos projections sur l'évolution de la zone critique soumises aux changements globaux, et fournir les éléments de connaissance permettant de répondre aux enjeux de gestion durable des ressources, de préservation des biens et bénéfiques de la nature pour les sociétés humaines.

## CONTEXTE SCIENTIFIQUE, TECHNIQUE ET SOCIÉTAL, LES ENJEUX

Les Surfaces et Interfaces Continentales constituent des zones de couplages entre le milieu physicochimique (*abiotique*) et le vivant (*biotique*). Ce texte présente quelques grandes lignes programmatiques pour lesquelles les processus couplés vivants/non-vivants mériteraient d'être mieux observés, mieux compris et mieux représentés dans les modèles. La prospective a identifié trois enjeux principaux: les couplages entre le vivant et le climat, le rôle du vivant dans les grands cycles biogéochimiques et les relations vivant/non-vivant impliquées dans la dynamique et l'impact des contaminants naturels et anthropiques. Nous nous sommes efforcés de montrer la valeur heuristique d'une approche interdisciplinaire de ces questions, au croisement des géosciences, des sciences de la biodiversité, et des sciences humaines et sociales.

Dans un premier temps, nous examinons les relations entre les grandeurs physiques caractérisant un climat (e.g., température, précipitation) et l'activité du vivant. Trois enjeux sont présentés: la description des organisations spatiales et

des dynamiques du vivant par des métriques de biodiversité fonctionnelle, le couplage des variables d'état décrivant les dynamiques du climat et du vivant et la représentation de ces couplages (actions et rétroactions) dans les modèles de surface et enfin la nécessité de mieux saisir comment les régimes de perturbation modifient les trajectoires couplées climat-vivant.

En second lieu, nous examinons comment mieux intégrer la diversité taxonomique et fonctionnelle du vivant dans l'étude des cycles biogéochimiques, entendu comme la quantification des stocks et des flux de matière dans les systèmes continentaux. Les enjeux portent sur une meilleure prise en compte que ce soit sur le terrain, au laboratoire et dans les modèles, (I) des caractéristiques biologiques des nano- (i.e., virus), micro- (e.g., archées, algues) et macro- (e.g., plantes vasculaires) organismes, incluant leurs cycles de vie, et (II) de leur organisation dans les systèmes continentaux, en termes de diversité et d'interactions. La quantification et la prédiction de la réactivité du système eau-matrice-organismes se trouvent au centre des questions sociétales liées à la gestion et à la qualité des eaux, des sols et des réservoirs géologiques. Face aux enjeux techniques

et sociétaux liés aux changements globaux et à la transition énergétique (géothermie, stockage de CO<sub>2</sub>, production d'hydrogène, exploration et exploitation des ressources minérales...), il est essentiel de comprendre comment la structure et la diversité des communautés biologiques régissent les flux d'éléments majeurs et traces en lien avec les processus physiques (e.g., flux préférentiel, érosion) et chimiques propres aux milieux terrestres pour évaluer et anticiper les processus de transformation et de transfert de la matière à différentes échelles de temps et d'espace.

Enfin, une troisième partie aborde les questions d'actions et de rétroactions entre le vivant et le non-vivant dans la compréhension des cycles des contaminants qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique. Les enjeux sociétaux concernent ici la préservation de nos ressources et la rémédiation des milieux contaminés ([www.worstpolluted.org](http://www.worstpolluted.org)). Les enjeux scientifiques portent sur la compréhension des mécanismes couplés vivant/non-vivant impliqués dans l'écodynamique et l'écotoxicité des contaminants et notre capacité à représenter ces couplages à différentes échelles spatiales et temporelles. Des verrous de connaissance subsistent sur les effets des contaminants sur le long-terme lors d'expositions chroniques, les effets associés aux multi-stress (effets cocktails, changement climatique, antibio-résistance, etc.), le transfert des contaminants entre les différents compartiments de la zone critique, ou encore sur la temporalité des processus que ce soit au niveau expérimental ou théorique.

Les enjeux scientifiques et verrous de connaissance sont présentés de manière suffisamment générique pour concerner différents types d'écosystèmes. Les liens vivant/non-vivant qui s'inscrivent dans le temps long – par exemple l'influence du vivant sur la composition de l'atmosphère au cours de l'histoire de la terre, les processus pédogénétiques – sont abordés dans d'autres parties du document (*Cycles longs, cycles courts; les matières organiques du sol*). Nous avons également veillé à être complémentaire des réflexions menées dans le cadre de la prospective CNRS-INEE 2017 et plus particulièrement de son atelier *Biosphère-Géosphère: approches intégrées*.

## LE VIVANT ET LE CLIMAT : ACTIONS ET RÉTROACTIONS

### État de l'art et verrous scientifiques et techniques

Notre constat de départ est que les complémentarités entre sciences de la biodiversité et sciences du climat restent insuffisamment explorées quand bien même les relations entre le vivant et le non-vivant sont au cœur des objectifs du développement durable et des sciences de la durabilité. Les

développements analytiques et numériques ouvrent sans cesse de nouvelles opportunités pour résoudre les questions propres à chaque champ disciplinaire. Ils favorisent la démultiplication des points de vue et donc des objets (*Le point de vue crée l'objet*, De Saussure). Le volume global des connaissances s'accroît mais l'édifice cognitif se parcellise. Ainsi, les sciences de la biodiversité et les sciences du climat ont développé, au cours des dernières décennies, des représentations de plus en plus sophistiquées des surfaces continentales terrestres mais la recherche de cohérences entre ces représentations est encore trop faible.

D'un côté, se sont formalisés des modèles s'attachant à comprendre les organisations et les dynamiques des assemblages de populations et d'espèces ainsi que leur propriétés émergentes à différentes échelles de temps et l'espace (Levin 1992, Hubbell 2001). Les développements en écologie statistique ont permis de révéler de grandes relations empiriques entre différentes facettes de la biodiversité (Gimenez et al. 2014). Toutefois, ces recherches restent insuffisamment connectées avec l'étude des processus clés de la zone critique assurés par le vivant comme la productivité primaire, la minéralisation de la matière organique, etc. Plusieurs auteurs soulignent la nécessité de mieux ancrer l'étude des biodiversités dans les principes de conservation de l'énergie et de la masse afin notamment de faciliter leur dialogue avec les géosciences (McGill et al. 2006). C'est dans ce contexte que se sont développés depuis plusieurs années des travaux privilégiant l'étude de la biodiversité fonctionnelle et qui concourent à mieux éclairer ces liens entre le vivant et le fonctionnement des écosystèmes (Lavorel and Garnier 2002, Cornwell et al. 2008). Une distinction est classiquement faite entre des traits de réponse – comment la biodiversité fonctionnelle co-varie avec le climat ou avec les régimes de perturbation – et des traits de réponse – pourquoi et comment certains traits affectent des processus clés du fonctionnement des surfaces. Des liens significatifs entre biodiversité fonctionnelle et processus de la zone critique concernent par exemple la minéralisation de la matière organique, la fixation du carbone par photosynthèse. En parallèle, ont été décrites **des structures de covariance entre traits** qui dessinent des grandes stratégies d'utilisation des ressources et de réponses aux perturbations par le vivant, et ce indépendamment des histoires biogéographiques. Il reste cependant beaucoup à faire pour que les avancées de l'écologie fonctionnelle soient mieux prises en compte dans les représentations plus mécanistes du fonctionnement des surfaces et interfaces continentales.

D'un autre côté, se sont développés des modèles de surface ayant pour enjeu de représenter les flux de matière et d'énergie échangés entre la surface terrestre et l'atmosphère. Au fil des années, ces modèles se sont considérablement enrichis en incorporant notamment de meil-

leures représentations du cycle de l'eau ou des grands cycles biogéochimiques. Des efforts plus récents ont visé à mieux prendre en compte le vivant dans ces modèles de surface avec notamment l'avènement de modèles couplés climat-végétation incorporant les effets du climat sur les grandes dynamiques de végétation et les rétroactions de la végétation sur le climat (Friedlingstein et al. 2001, Pitman 2003). Cela étant, il reste beaucoup à faire pour que l'étude de la physique et de la chimie des enveloppes terrestres enrichisse sa représentation du vivant et accorde une place plus significative aux concepts et avancées issues des sciences de la biodiversité (Reichstein et al. 2014). En effet, ce qui prédomine encore est une approche dans laquelle la représentation du vivant est discrétisée en grands types fonctionnels (*Plant Functional Types*) comme les savanes, les forêts tempérées, les forêts boréales...), chacun de ces PFTs étant caractérisé par un ensemble de paramètres fixes (Van Bodegom et al. 2012). Cette représentation du vivant dans les modèles de surface présente plusieurs faiblesses : (1) elle ignore la variabilité fonctionnelle observée au sein même des assemblages d'espèces et le rôle de ces complémentarités ou redondances fonctionnelles dans le bilan énergétique et le bilan hydrique des surfaces, (2) elle mésestime les variations continues de la diversité fonctionnelle au sein d'un PFT le long des gradients bioclimatiques (3) elle ne rend pas suffisamment compte des effets des perturbations (par exemple les régimes de feux, le pâturage) sur les dynamiques entre PFT ou la composition fonctionnelle au sein des PFTs. Quelques travaux récents soulignent qu'une représentation plus fine du vivant dans les modèles de surface améliore les projections sur les flux et à l'échelle globale (Brovkin et al. 2012, Wang et al. 2012).

Il convient donc aujourd'hui de dépasser une situation dans laquelle (1) les sciences de la biodiversité considèrent uniquement les grandeurs physiques du climat comme des variables explicatives de modèles empiriques de biodiversité, modèles insuffisamment ancrés dans les principes de conservation de la masse et de l'énergie, (2) les sciences du climat réduisent le vivant à quelques paramètres de caractérisation des surfaces d'échange en ignorant les acquis des sciences écologiques sur les liens biodiversité - fonctionnement des écosystèmes. En d'autres termes, il s'agit de mieux reconnaître que le vivant n'échappe pas aux lois thermodynamiques et que la physique du climat est aussi une biophysique. Une compréhension plus fine des liens entre le vivant et le climat nécessite selon nous (1) que les sciences de la biodiversité s'attachent à mieux comprendre et à mieux représenter par des variables d'état les organisations spatiales et les dynamiques de la **biodiversité fonctionnelle**, (2) que les modèles biophysiques de fonctionnement des surfaces terrestres représentent plus fidèlement la réponse de la biodiversité fonctionnelle au climat et **l'influence de**

**la biodiversité fonctionnelle sur le climat**, et enfin (3) que l'on saisisse mieux les modalités par lesquelles les régimes de perturbation affectent les grandes dynamiques de biomasse et ses interactions avec le climat. La figure 1 résume ces grands axes de travail dont une description plus détaillée est fournie ci-dessous.

### Priorités pour les années à venir

#### *Mieux connaître les traits fonctionnels pour tendre vers une biogéographie fonctionnelle*

L'écologie fonctionnelle a développé des outils conceptuels et méthodologiques pour étudier la **diversité des traits fonctionnels** à différents niveaux d'organisation (populations, espèces et assemblages d'espèces). La lecture de la biodiversité par les traits fonctionnels plutôt que par l'identité des espèces (taxonomie) représente une avancée considérable pour qui veut mieux inscrire le vivant dans une représentation biophysique du fonctionnement des surfaces terrestres (Hooper and Vitousek 1997). Nous pointons les priorités de recherche suivantes pour poursuivre dans cette voie :

- **Compléter notre connaissance des traits fonctionnels** en priorisant notamment les espèces qui contribuent le plus à la biomasse et à la dynamique des écosystèmes (espèces structurantes et espèces ingénieuses). Moins de 10 % des plantes vasculaires ont été incluses dans les approches comparatives et encore la plupart ne sont documentées que pour quelques traits. Les biomes tropicaux sont sous-représentés et la méconnaissance de la diversité fonctionnelle au sein des forêts tropicales humides a conduit à des simplifications abusives. La connaissance des traits racinaires est très faible en regard du rôle prépondérant que joue la rhizosphère dans les grands cycles biogéochimiques et hydriques. La diversité fonctionnelle des plantes non vasculaires est largement méconnue bien qu'elle soit de première importance pour certains biomes (par exemple les mousses et les lichens dans le biome arctique). Enfin, l'assemblage et la mise à disposition des informations via des bases de données structurées reste encore un défi considérable malgré le succès de certaines compilations.
- **Biodiversité fonctionnelle des assemblages d'espèces.** La caractérisation des métriques de biodiversité fonctionnelle à l'échelle des assemblages d'espèces nécessite d'être approfondie car c'est à cette échelle que se tisseront préférentiellement les liens avec les modèles de climat. Différentes approches sont à développer et à comparer afin d'estimer ces métriques de diversité fonctionnelle à cette échelle et de spatialiser l'information : agréger les valeurs de traits des espèces en tenant compte de leur abondance relative dans la communauté, recourir à des

méthodes non invasives telle que l'imagerie hyperspectrale (Ustin and Gamon 2010). Dès lors différentes questions devront être approfondies : la variabilité observée des traits au sein d'un assemblage concoure-t-elle à une utilisation plus optimale des ressources ? les structures de covariances entre traits mesurés à l'échelle des espèces (notion de compromis fonctionnels) se retrouvent-elles à l'échelle des assemblages ? Selon quelles modalités la diversité fonctionnelle influence-t-elle la phénologie des écosystèmes ?

- **Diversification fonctionnelle et biogéographie fonctionnelle.** Les changements mieux documentés de la diversité fonctionnelle dans le temps et dans l'espace doivent nourrir des modèles de distribution. L'avènement d'une biogéographie fonctionnelle qui s'appuie et adapte pour ses questions propres les concepts de niche utilisés pour la modélisation des espèces ouvre de nouvelles voies de recherche (Violle et al. 2014). Les liens entre climat, régime de perturbation et diversification fonctionnelle des assemblages sont à mettre à jour que ce soit via des relations empiriques ou via l'application de règles d'optimisation des ressources. La dynamique des grands compartiments de biomasse notamment le long des grands écotones devront être aussi caractérisés par les changements de traits. Des cohérences plus fortes entre modèles démographiques d'espèces ingénieurs ou structurantes et diversité fonctionnelle sont aussi à rechercher.

### Couplages biomasse - traits - climat

Ce à quoi il faut s'atteler ici est un travail d'exploration plus systématique des différentes modalités de couplages possibles entre la dynamique des grands compartiments de biomasse, les caractéristiques fonctionnelles de cette biomasse et les bilans hydriques et énergétiques des surfaces terrestres. Nous considérons que la biodiversité fonctionnelle a vocation à jouer un rôle de pivot entre des modèles écologiques décrivant la dynamique du vivant et les modèles physiques du climat. Nous mettons en avant trois grands chantiers pour mieux relever ce défi :

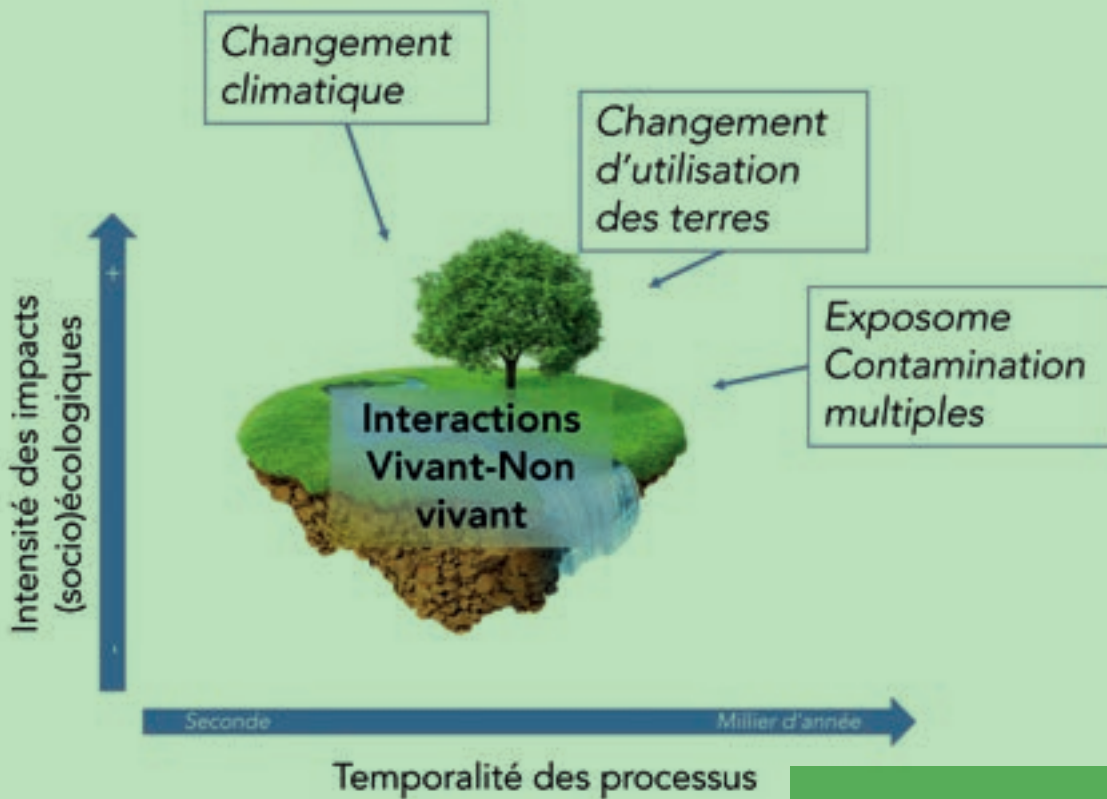
- **Substituer aux PFT une représentation continue et dynamique de la diversité fonctionnelle.** À la représentation des grands compartiments de biomasse par quelques types (les PFTs), il faudra substituer des variations continues de caractéristiques fonctionnelles. Des relations empiriques décrivant la diversification fonctionnelle le long des gradients de l'environnement pourront être utilisées pour calibrer ou valider des modèles de flux. Il serait par exemple envisageable d'introduire une paramétrisation distribuée de la teneur en azote des prairies dans des modèles de productivité primaire (Violle et al. 2015). Un autre enjeu est de mieux prendre en compte les compromis fonctionnels afin de mieux contraindre la paramétrisation

de ces modèles. Enfin, les structures de covariance entre caractéristiques fonctionnelles doivent aussi être utilisées pour délimiter le champ des possibles lorsque l'on étudie la sensibilité des modèles à l'incertitude des paramètres d'entrée.

- **Du changement climatique au changement bioclimatique.** Les grandeurs physiques mesurées en sciences du climat sont rarement celles directement et immédiatement perçues par les organismes, celles qui vont conditionner la dynamique et le fonctionnement du vivant. Il nous faut donc mieux expliciter pourquoi et comment les changements climatiques constituent aussi des changements bioclimatiques. Par exemple comment des changements de régime de précipitation modulent-ils la disponibilité en eau dans les horizons racinaires et comment se reconfigurent en conséquence la distribution et les propriétés fonctionnelles des biomasses racinaires ? Comment l'architecture des ligneux modulent-ils la dynamique saisonnière de l'enneigement et le climat du sol dans le biome arctique ? Le rôle du vivant dans la **construction de niches** bien mis en avant dans le cas des espèces ingénieuses est rarement prise en compte dans les modèles de surface. Le vivant peut tamponner la magnitude du changement climatique (De Frenne et al. 2013).
- **Les rétroactions du vivant sur le climat.** Il nous faut mieux comprendre comment les grands compartiments de biomasse peuvent modifier le climat régional. Comment, par exemple, la dynamique des végétations ligneuses et sous-ligneuses observée à l'écotone taiga-tundra rétroagit sur le bilan radiatif des surfaces (Sturm et al. 2001) ? Quelles sont en climat semi-aride les conséquences des changements de couverture végétale sur les régimes de précipitations ? Un défi concerne également l'articulation entre des processus lents et des processus rapides. Par exemple les réponses du vivant aux changements climatiques et par conséquent leurs rétroactions sur le climat ne sont pas toujours immédiates (notion de dette climatique) et les asynchronies qui en résultent exigent d'introduire des modalités de couplage plus complexes entre climat et vivant.

### Articuler les régimes de perturbation et trajectoires des relations climat-vivant

Il existe des liens étroits entre régimes de perturbation, climat et dynamique des grands compartiments de biomasse. Par exemple, les régimes de feu ou l'herbivorie sont particulièrement importants pour comprendre les interactions entre groupes fonctionnels de plante (herbe, arbuste, arbre) et leur distribution notamment le long des grands écotones (Bond et al. 2005). Ces régimes de perturbation restent sous-représentés dans les modèles de climat. Deux priorités de recherche sont identifiées :



OBJECTIFS DE DEVELOPPEMENT DURABLE



Vision schématique de la convergence attendue entre les sciences de la biodiversité et les sciences du climat: (I) les premières s'attachent à mieux comprendre les organisations spatiales et les dynamiques de la biodiversité fonctionnelle (II) les secondes s'attachent à mieux représenter le compartiment biotique dans les modèles de surface. La résultante de ce double mouvement est un couplage plus étroit et plus équilibré des variables d'état décrivant la dynamique les différents compartiments du système et une meilleure compréhension de ses réponses aux changements globaux.

- **Mieux articuler les modèles écologiques de faible dimension et les modèles couplés climat-végétation.** Les grandes relations empiriques mises à jour entre régime de perturbation et biodiversité ou les modèles phénoménologiques de faible dimension qui capturent ces dynamiques doivent être davantage prises en compte dans la calibration ou la validation des modèles couplés climat-végétation (DGVM).
- **Mieux représenter les écosystèmes fortement anthropisés.** Bien que la grande majorité des surfaces terrestres soit à des degrés divers impactée par les activités humaines, notre représentation des surfaces terrestres et de leur fonctionnement laisse une place insuffisante aux effets de l'utilisation des terres et aux trajectoires d'utilisation des terres (Ellis and Ramankutty 2008). Il faut ici s'attacher à mieux comprendre comment les usages du sol reconfigurent les biodiversités fonctionnelles et quels sont par effet cascade (ou effet indirect) les conséquences de ces changements de biodiversité sur le fonctionnement des écosystèmes. Un autre enjeu sera d'examiner quels sont les effets des changements de mode de production ou des itinéraires techniques (par exemple la mise en place de mesures agroécologiques ou les phénomènes de déprise agricole) sur les bilans hydrique et énergétique des agroécosystèmes et quelle part de ces modifications est médiée par les changements des biodiversités.



## LE VIVANT DANS LES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES DES SURFACES CONTINENTALES

### État de l'art et verrous scientifiques et techniques

Par rapport à la dernière prospective scientifique SIC, les savoir-faire issus des approches « omiques » et le travail de conceptualisation de ces afflux d'information (« big data »), ainsi que les techniques de traçage (imagerie et isotopie notamment) appliquée à l'étude de la diversité et des fonctionnalités des organismes apportent un nouvel élan à l'étude approfondie des cycles biogéochimiques à différentes échelles. Ces outils permettent de développer de nouvelles approches pour obtenir des photographies instantanées intégrative et/ou cinétique de l'état de la zone critique perturbée par différents forçages. Les verrous principaux concernent cependant le traitement puis l'intégration de ces données à celles issues des approches plus traditionnelles de l'étude des cycles biogéochimiques et à l'étude du fonctionnement global des écosystèmes. Quelles sont les voies d'intégration et de combinaison de données « multi-omiques », d'imagerie et isotopiques pour (I) mieux comprendre comment les caractéristiques des écosystèmes (i.e., organisation et succession communautaire, interactions entre organismes, acclimatation et adaptation face aux perturbations hydro-climatiques et anthropiques, etc.) modulent les cycles biogéochimiques sur les temps courts et longs, et (II) prédire l'évolution des services écosystémiques associés ? De plus, l'hétérogénéité spatiale des processus réactionnels dans la zone critique et l'identification de leur caractère pérenne ou transitoire demeure un verrou scientifique majeur.

### Priorités pour les années à venir

#### *Coupler la conceptualisation des organismes et leurs interactions avec la modélisation du transport de matière et des solutés dans les surfaces continentales*

Aborder ces verrous demande un travail de conceptualisation systématique pour intégrer ces données (omiques et autres) et prendre en compte l'évolution de la diversité des communautés biologiques sur les fonctions biogéochimiques et écologiques à différents niveaux des écosystèmes.

À l'échelle de l'organisme, la modélisation métabolique, assistée d'outils tels que le « FBA » ou « machine learning », peut permettre d'établir des scénarios de régulation de gènes spécifiques en fonction des changements des paramètres environnementaux abiotiques ou biotiques et pourrait progressivement être couplée aux modèles biogéochimiques de quantification des flux et des stocks. Il semble aujourd'hui envisageable de s'appuyer sur des approches descriptives à haute résolution et à haut débit (changement

de transcriptome, protéome et métabolome) afin de tendre vers une systématique « organisme par organisme » permettant de générer des données de premier ordre pour quantifier l'impact direct ou indirect des organismes sur certains processus biogéochimiques élémentaires (e.g., altération, diagénèse de la matière organique, méthanogenèse, transformation de polluants). Cette approche peut par exemple servir à définir des lois phénoménologiques et cinétiques et modéliser les propriétés physico-chimiques d'interfaces fluide/minéral/organismes et leur évolution au cours des réactions de dissolution/altération des minéraux.

Dans cette optique, le développement de schémas conceptuels des processus biogéochimiques dans des systèmes d'interface simples, incorporant des bilans élémentaires modulés par un organisme modèle et son évolution métabolique constitue une voie prometteuse. Ces développements peuvent d'ailleurs évoluer pour prendre en compte les associations inter-organismes, et poser ainsi des jalons d'incorporation graduelle de la diversité des communautés biologiques dans les modèles biogéochimiques, en tenant compte possiblement des interactions avec les propriétés physico-chimiques de la matière. Ainsi, l'analyse multi-échelle des propriétés physico-chimiques de la matière colloïdale naturelle divisée (argiles, micro-organismes, (nano)particules organiques ou minérales) ou minérale pour comprendre les interactions entre constituants vivants et abiotiques s'appuie aujourd'hui sur des modèles à base thermodynamique dont un des verrous prioritaires est le couplage intrinsèque entre la cinétique chimique réactionnelle et la dynamique des transferts de diffusion des différents (bio)objets en jeu.

À un degré de complexité intermédiaire, les développements récents des approches expérimentales et de modélisation en bioréacteurs, permettant de contrôler certains paramètres environnementaux pour mener un écosystème vers une fonction donnée, ouvre un champ d'investigation considérable pour synchroniser les fréquences d'observation courtes (organismes) et longues (processus biogéochimique/géologique). La méso-échelle des bioréacteurs semble propice au développement de recherches sur les interactions microbiennes car ils mettent en œuvre des écosystèmes simplifiés par la pression de sélection imposée par les conditions opératoires, permettant possiblement l'étude de l'effet combiné de différents organismes. En particulier, le rôle des virus dans la régulation des cycles élémentaires de la zone critique demeure très peu exploré.

À l'échelle de la communauté, les traits fonctionnels constituent une porte d'entrée logique pour caractériser la biodiversité des milieux d'interfaces et les interactions inter-organismes par l'étude des fonctions exprimées par différents compartiments de la biomasse, notamment en réponse aux variations environnementales. Cela passe par l'identification de propriétés ou types fonctionnels de la biodiversité de l'atmosphère sub-édaphique, des sols et des sédiments,

et des végétaux (rhizosphère, phyllosphère, etc.), et le renforcement des approches couplant groupes fonctionnel de réponse (basés sur la niche écologiques des organismes) et d'effet (spectre des modes d'action des organismes) afin d'intégrer la biodiversité fonctionnelle dans les modèles biogéochimiques en incorporant, par exemple, des modèles dynamiques de la biomasse ou d'activités enzymatiques spécifiques ou encore les trajectoires fonctionnelles des écosystèmes suite à des perturbations (résistance, résilience, adaptation).

### **Évaluer la structuration et l'organisation du milieu physique et chimique par les organismes et réciproquement - effets indirects du vivant sur les cycles élémentaires**

D'un point de vue conceptuel, la plupart des approches à l'interface Géosciences-Biosciences demeurent fondamentalement unidirectionnelle en ciblant soit l'effet des variables physicochimiques sur l'évolution des écosystèmes, soit l'impact des organismes sur les cycles biogéochimiques. Il semble cependant que l'étude spécifique des liens de rétroaction (directe et indirecte) entre les organismes et leurs matrices peut former un cadre conceptuel commun et générateur d'approches scientifiques innovantes et intégrées, tenant compte des différents niveaux de résolution (actuels et anciens), actuellement compartimentés. Une réflexion transversale (en lien avec le CNRS-INEE) pour définir un tel cadre pourrait par exemple engendrer des démarches pour transposer les phénomènes anciens (e.g., flux élémentaires) résultant du couplage organismes-matrices ou écosystèmes/paysage avec les processus et les changements environnementaux actuels et inversement.

La stœchiométrie des écosystèmes et le métabolisme des interfaces organismes-matrices se trouvent au cœur de la relation entre les organismes ingénieurs et le fonctionnement des écosystèmes. Les nouvelles méthodes d'analyse (omiques, activités éco-enzymatiques) appliquées aux interfaces offrent des possibilités de caractériser notamment les variations spatiales et temporelles des grandes fonctions microbiennes en lien avec les cycles du carbone, de l'azote ou du phosphore. Un défi consiste notamment à mieux caractériser la dynamique des processus cinétiques rapides ou transitoires (e.g., exsudation racinaires) et les cycles de vie des organismes aux interfaces biogéochimiquement actives. Ces données peuvent notamment compléter et nourrir les estimations de la stœchiométrie C:N:P des compartiments de la biomasse. Elles peuvent également fournir une vision plus complète des stratégies et phénomènes de prélèvement, de stockage et de libération des nutriments à différents niveaux trophiques, permettant par exemple d'évaluer l'influence des forçages environnementaux et anthropiques sur les relations trophiques et non-trophiques dans les écosystèmes.

Il convient également de tenir compte dans l'étude des cy-

cles de l'influence des rétroactions entre les processus et les contraintes géomorphologiques et les organismes (par une approche « biogéomorphologique »), et en retour, de la sélection des traits. Ces rétroactions sont particulièrement pertinentes pour améliorer la prédiction des écoulements préférentiels surface-souterrain en tenant compte de l'effet combiner des végétaux et de la macrofaune, ou encore de l'érosion des sols et des roches (e.g., biostabilisation/bioaltération des surfaces anthropogènes) face au forçage hydro-climatique, en considérant davantage le rôle et les caractéristiques des biofilms et des végétaux. Les effets indirects du vivant sur les transferts d'éléments biotiques (flux biologiques) entre les compartiments de la zone critique sont d'ailleurs souvent négligés, bien qu'à l'origine de modifications morphologiques significative des compartiments récepteurs (e.g., propagation végétale ou algale) ou d'impacts sanitaires.

Finalement, les rétroactions organismes/non-vivants sont au centre des dynamiques éco-évolutives: les traits des organismes affectent l'interaction entre les processus écologiques, et donc les cycles biogéochimiques, notamment par des modifications physiques de l'habitat, qui elles-mêmes contrôlent l'évolution des traits. Comprendre cette rétroaction et la tracer avec les proxys modernes représente certainement un enjeu de rassemblement des communautés étudiant le fonctionnement et l'évolution des écosystèmes actuels et passés.

## **CYCLE DES CONTAMINANTS ET INTERACTIONS AVEC LE VIVANT**

### **État de l'art et verrous scientifiques et techniques**

Au sein de la zone critique, le devenir des contaminants est contrôlé par des interactions complexes et multiples avec les constituants fluides, minéraux, organiques et vivants. Ces dernières années des efforts ont été faits par la communauté SIC pour une meilleure compréhension de l'écodynamique, de l'écotoxicité des contaminants, et des risques associés. En particulier, l'accent a été mis sur le couplage des processus physiques, chimiques et biologiques mis en jeu au sein d'un même compartiment afin d'évaluer leurs conséquences en termes de flux et de bilans (e.g. **Charlet et al. 2011**). Des efforts ont également visés à mieux prendre en compte les effets rétroactifs des contaminants sur le vivant et inversement à différentes échelles spatiales, temporelles mais aussi d'organisation du vivant allant de l'individu à l'écosystème (**Lowry et al. 2012**). Tout ceci requiert d'être capable de finement caractériser les mécanismes moléculaires se produisant aux interfaces vivant/non vivant mais aussi de modéliser les processus impliqués.

Cependant des verrous scientifiques et techniques demeurent dans la compréhension des mécanismes biotiques

et abiotiques impliqués dans la dynamique et l'impact des contaminants naturels ou anthropiques, émergents ou traditionnels (organiques, inorganiques, radioéléments, nanoparticules, médicaments, perturbateurs endocriniens, etc.). Il s'agit en particulier d'une meilleure prise en compte de la temporalité des processus, du transfert des contaminants entre les différents compartiments de la zone critique sur le long terme, mais aussi des effets antagonistes ou synergiques existant lors de l'exposition à des cocktails de contaminants, ou lors de la combinaison de multi-stress dans un contexte de changement global (Guédron *et al.* 2017). Faire sauter ces verrous nécessitera un travail pluridisciplinaire aboutissant à un travail exhaustif, géochimie, microbiologie, hydrologie, pédologie, minéralogie, toxicologie, santé ou sciences sociales. Cela nécessitera également des avancées techniques afin d'améliorer les limites de détection (contaminants organiques et métalliques) et limites de caractérisation de leur spéciation. En travaillant dans des conditions d'exposition toujours plus réalistes, les teneurs en contaminants utilisés sont très faibles, proches des fonds géochimiques, ce qui rend la caractérisation dans les matrices environnementales complexes. Enfin, la modélisation du comportement de ces contaminants, de leur devenir et de leurs effets sur l'environnement et la santé humaine sur le long terme, représente également un outil important pour mieux appréhender les processus en jeu, leur temporalité, et sera d'une grande aide dans la gestion des risques induits pour les décideurs publics (Hendren *et al.* 2013).

### Priorités pour les années à venir

#### Vers une meilleure prise en compte de la temporalité des processus

Le devenir des contaminants au sein de la zone critique est contrôlé par des interactions complexes et multiples avec les fluides, les minéraux, les composés organiques et les organismes vivants. Décrypter le devenir et les impacts des contaminants à l'échelle la plus élémentaire permet de mieux appréhender les processus à plus grande échelle (paysage, bassin versant...). Les mécanismes bio-physico-chimiques impliqués dans le transfert et l'impact des contaminants se répercutent en effet à tous les niveaux d'organisation biologique, jusqu'à la modification du fonctionnement des écosystèmes et de la biosphère, *sensu lato*. Une compréhension de ces mécanismes à l'échelle moléculaire permet donc de minimiser la perte d'information lors des nécessaires changements d'échelles spatiales ou temporelles.

Cependant, la **temporalité des mécanismes**, *i.e.*, les **temps caractéristiques** pour une échelle d'observation doivent être mieux appréhendés et pris en compte dans la prédiction des effets toxiques des contaminants sur le vivant. L'intégration au cours du temps des contaminants dans des chaînes réactionnelles biologiques, requiert de hiérarchi-

ser (*via* la mesure et le développement de modèles théoriques) les différents temps caractéristiques de formation/dissociation des complexes formés entre métaux et agents colloïdaux, mais aussi de leur labilité par rapport aux processus d'internalisation des différentes formes métalliques bioassimilables, des processus réactionnels et de transferts au niveau intracellulaire (stockage, excrétion...), mais aussi au niveau des transferts trophiques. La prise en compte de cette temporalité que ce soit au niveau expérimental ou théorique reste encore limitée de même que ses conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes.

#### Mieux comprendre le transfert des contaminants entre les compartiments de la zone critique

Les études menées dans la zone critique découpent souvent les différents compartiments. Pourtant beaucoup de questions demeurent encore sur la **dynamique des polluants et des fluides biologiques** entre les différents compartiments de la zone critique. Mieux identifier la spéciation des contaminants (forme chimique, phase porteuse colloïdale ou particulaire, etc.) depuis la source jusqu'aux cibles finales (en milieux complexes) représente toujours un défi en raison des faibles doses et à la transformation physico-chimique des polluants (instabilité redox par exemple). Les impacts sanitaires suite aux transferts de flux biologiques dans la zone critique (formation de bioaérosols toxiques, accumulation de toxines dans les eaux, les sédiments ou les sols, transfert facilité de contaminants vers les nappes ou l'atmosphère, contribution des fluides excrétés par les plantes dans le transfert des contaminants...) sont encore mal compris et restent largement sous-étudiés.

Un défi pour les années à venir sera de mieux identifier sur le long-terme les flux de contaminants entre les différents compartiments de la zone critique, les trajectoires fonctionnelles des écosystèmes suite à des contaminations anciennes, mais aussi de comprendre comment la réponse du vivant à une exposition sur le long terme affecte la dynamique des contaminants eux-mêmes. Ces notions restent difficiles à aborder car le niveau de base de la pollution est souvent méconnu. L'utilisation d'**archives environnementales** naturelles (sédimentaires, et autres) et l'utilisation d'**analogues naturels** pourraient permettre une avancée dans ce domaine. Cette rétro-observation permettrait d'identifier des niveaux « pré-contamination » et de contribuer à améliorer les modélisations grande échelle des flux au sein de la zone critique.

#### Évaluation des risques potentiels associés aux polluants émergents

Un manque avéré de connaissances existe sur les polluants dits émergents particulièrement sensibles aux interactions biotique-abiotiques (produits pharmaceutiques, antibiotiques, résidus nanométriques de dégradations des matériaux, métaux high-tech...). Cela réside dans la difficulté de

les **identifier** mais aussi de **quantifier** les niveaux d'exposition car en lien direct avec les développements industriels (peu d'information disponible dans le domaine public), complexité des assemblages (composites, cycle de vie des nouveaux matériaux...). Par définition peu de recul existe sur l'écodynamique et l'écotoxicité de ces polluants émergents. C'est pourquoi comprendre comment les réponses du vivant à des expositions à court terme informent sur des effets sur le long terme à des concentrations faibles reste un défi. La modélisation du comportement de ces contaminants, de leur devenir et effet sur l'environnement et la santé humaine, représente également un outil important pour mieux appréhender les processus en jeu, et peut être d'une grande aide dans la gestion des risques induits et la réglementation pour les décideurs publics.

### Évaluation des effets multi-stress

Les travaux menés ces dernières années 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 types de contaminants présents. Pourtant étudier les interactions et les compétitions entre contaminants est incontournable en terme d'écodynamique mais aussi d'écotoxicité. En plus des effets dits « cocktail », dans le contexte actuel de changement global, les organismes et les écosystèmes sont exposés à des stress multiples (stress hydrique, nutrition, eutrophisation, etc.). La question de l'identification du « point de bascule » lié au cumul de légers stress chroniques est au cœur des **effets multi-stress** et des **effets cocktails**. Cela requiert une meilleure compréhension des effets directs des contaminants lorsqu'ils se retrouvent en cocktail et susceptibles d'induire des effets synergiques ou antagonistes, mais aussi indirects comme la fragilisation des organismes vivants, leur plus grande sensibilité aux variations des paramètres du milieu, etc. La question émergente de l'**antibiorésistance** est complexe à aborder du fait de son origine multiple mais engendrera des conséquences importantes sur les écosystèmes qu'il est important d'appréhender. L'étude des effets cocktails et multi-stress apparaît comme un véritable verrou se confrontant à de nombreux biais expérimentaux et difficultés analytiques. Par exemple, l'écodynamique et l'écotoxicité du cocktail dépendront fortement du scénario de co-contamination choisi. L'étude des effets cocktails et multi-stress pertinents sur des temps longs demande à la fois une caractérisation fine de l'ensemble de l'exposome *via* des outils analytiques adaptés (analyses non-ciblées) mais aussi le développement d'indicateurs d'impacts globaux sur le long terme suite à des contaminations à faibles doses (approches omiques, mésocosmes). Enfin, les effets synergiques du **changement climatique** et de l'**anthropisation** sur le cycle des contaminants doivent être mieux appréhendés. L'augmentation de l'eutrophisation et des épisodes anoxiques en milieu aquatique du fait de l'augmentation de la température et des intrants en nutriments sont susceptibles de fortement affecter la biodisponibilité des contaminants (augmentation de la méthylation, de la teneur en acides organiques et en molécules thiolées). Des initiatives en liens avec la *COP21* permettraient de renforcer cette thématique.

## IMPLICATIONS

### En termes de moyens en équipement, d'analyses ou de nouvelles techniques

- Développer de nouveaux outils **omiques** (génomique environnementale metabarcoding, génétique des populations, transcriptomique, protéomique) notamment dans le cadre de l'étude des flux de matière et de contaminants entre les compartiments de la zone critique.
- Favoriser les approches interdisciplinaires dans le suivi et l'analyse d'expérimentations en système contrôlé ou semi-contrôlé, par exemple en développant des approches en **mésocosmes ou bioréacteurs**.
- Favoriser l'étude des mécanismes biogéochimiques aux interfaces vivant/contaminant via de nouvelles approches **électrochimie, couplage isotopie/spéciation**.
- Organiser et développer des **bases de données** rassemblant des informations par nature hétérogène sur les trajectoires des socio-écosystèmes, avec la perspective de mieux saisir dans le temps et l'espace les problématiques de risques, de vulnérabilité et de résilience.
- Mieux associer les **sciences de l'évolution** dans les travaux sur la dynamique de la zone critique dans un contexte de changements globaux.
- Favoriser l'utilisation d'**archives environnementales** naturelles et l'utilisation d'**analogues** naturels pour améliorer les modélisations grande échelle mais aussi pour mieux orienter les expérimentations en laboratoire.

### En termes de chantiers et moyens d'observation (SNO, ZA, OHM...)

- Faire converger les projets d'observations relevant des sciences de la biodiversité et ceux relevant des géosciences sur **des sites ateliers communs**. Cela peut par exemple se concevoir à l'échelle de parcelles instrumentées, de bassins versants ou de territoires suivis dans le cadre des réseaux RBV et RZA.
- Rechercher de manière plus systématique les **complémentarités entre approches par observations, expérimentations et enquêtes**; par exemple en associant plus étroitement les études portant sur la dynamique des biodiversités, les mesures de flux de matière et d'énergie, les analyses historiques et socio-économiques des territoires.

### En termes d'outils programmatiques et d'organisation de la recherche

- Faire **des OSU les lieux privilégiés de la recherche en sciences de la zone critique**, ce qui nécessite de faire évoluer les modes de gouvernance et de fonctionnement de ces structures afin que chaque organisme et institut du CNRS puisse y trouver sa place et bénéficier de la dynamique collective.
- créer un groupe de réflexion sur les rétroactions vivant-non vivant en lien avec la mission pour l'interdisciplinarité du CNRS.
- Organiser une année thématique sur les interactions vivant/non-vivant

- Développer le lien et les réflexions sur les interactions vivant-non vivant dans le programme EC2CO (par exemple avec une politique incitative pour des synergies entre BIOEFFECT et MICROBIEN)

### **En termes de personnels, développement de compétences**

- S'inspirer des politiques mises en œuvre dans le cadre des SNO pour définir et soutenir **des tâches d'observations de l'ensemble des compartiments constitutifs des socio-écosystèmes** (notamment pour le suivi des variables essentielles de biodiversité et pour le suivi des modes d'utilisation des terres).
- Développer des compétences dans les domaines de la biogéomorphologie, de l'intégration des données issues des « omiques » dans les modèles biogéochimiques et hydrogéologique, mais aussi dans la compréhension des mécanismes biogéochimiques aux interfaces vivant/contaminant par des nouvelles approches couplant électrochimie, isotopie et spéciation.

### **RELATION AVEC LES OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE (ODD)**

En lien avec l'ODD 04. **Santé et bien-être.**

- Fournir les connaissances sur le cycle de vie de nouveaux produits avant leur mise sur le marché. Cela concerne différents domaines technologiques (technologies high-tech, biotechnologies, nanotechnologies, technologies de la communication et de l'information, de l'énergie, etc. (**Luttrupp and Lagerstedt 2006**). Favoriser l'éco-conception.

- Mieux comprendre et informer sur les relations entre santé et biodiversité. Il s'agit d'une thématique revêtant diverses facettes : relations entre les différentes facettes et échelles de la biodiversité et l'abondance, la diversité des pathogènes, les transferts de pathogènes par les vecteurs ; coûts et bénéfices des contacts avec la biodiversité remarquable ou d'expériences d'immersion dans la nature pour la santé (en particulier dans le cadre des pratiques sportives)

En lien avec l'ODD 12. **Consommation et production responsable :**

- mieux évaluer les coûts et bénéfices environnementaux des différents modes de production en agriculture. Il est attendu ici que les connaissances en écologie des écosystèmes et en géosciences soient davantage mobilisées pour comprendre le fonctionnement et la trajectoire des agroécosystèmes. Cela concerne notamment l'évaluation des rôles des biodiversités dans les modes de production soutenable, la préservation du potentiel de fertilité du sol, les interactions entre intrants et diversité-fonctionnement des sols agricoles.

En lien avec ODD 13. **Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions.**

- Les recherches sur les liens abiotique-biotique ont notamment pour enjeu de fiabiliser les projections sur le devenir de la zone critique et des socio-écosystèmes dans le contexte des changements climatiques.

En lien avec l'ODD 15. **Gestion durable des ressources.**

- Mieux évaluer et informer sur les liens entre fonctionnement des écosystèmes/agroécosystèmes et climat local et régional, sur les conséquences de l'érosion de la biodiversité sur la fourniture des services par les écosystèmes (en particulier les services dits de production et de régulation).

### **RÉSUMÉ EXÉCUTIF**

**Les Surfaces et Interfaces Continentales constituent des zones de couplages entre le milieu physicochimique (abiotique) et le vivant (biotique). Cet atelier de la prospective a identifié trois enjeux majeurs pour lesquelles les processus couplés vivants/non-vivants mériteraient d'être mieux observés, mieux compris et mieux représentés dans les modèles : I) les couplages entre le vivant et le climat, II) le rôle du vivant dans les grands cycles biogéochimiques, et III) les relations vivant/non-vivant impliquées dans la dynamique et l'impact des contaminants naturels et anthropiques. Nous nous sommes efforcés de montrer la valeur heuristique d'une approche interdisciplinaire de ces questions, au croisement des géosciences, des sciences de la vie, et des sciences humaines et sociales.**

**Dans le cadre du premier enjeu concernant les relations entre les grandeurs**



physiques caractérisant un climat (e.g., température, précipitation) et l'activité du vivant, trois verrous ont été identifiés : la description des organisations spatiales et des dynamiques du vivant par des métriques de biodiversité fonctionnelle, le couplage des variables d'état décrivant les dynamiques du climat et du vivant et la représentation de ces couplages (actions et rétroactions) dans les modèles de surface, et enfin la nécessité de mieux saisir comment les régimes de perturbation modifient les trajectoires couplées climat-vivant.

Le deuxième enjeu pour les années à venir sera de mieux intégrer la diversité taxonomique et fonctionnelle du vivant dans l'étude des cycles biogéochimiques, entendu comme la quantification des stocks et des flux de matière dans les systèmes continentaux. Les enjeux portent sur une meilleure prise en compte que ce soit sur le terrain, au laboratoire et dans les modèles, (I) des caractéristiques biologiques des nano- (i.e., virus), micro- (e.g., archées, algues) et macro- (e.g., plantes vasculaires) organismes, incluant leurs cycles de vie, et (II) de leur organisation dans les systèmes continentaux, en termes de diversité et d'interactions. La quantification et la prédiction de la réactivité du système eau-matrice-organismes se trouvent au centre des questions sociétales liées à la gestion et à la qualité des eaux, des sols et des réservoirs géologiques. Face aux enjeux techniques et sociétaux liés aux changements globaux et à la transition énergétique (géothermie, stockage de CO<sub>2</sub>, production d'hydrogène, exploration et exploitation des ressources minérales...), il est essentiel de comprendre comment la structure et la diversité des communautés biologiques régissent les flux d'éléments majeurs et traces en lien avec les processus physiques (e.g., flux préférentiel, érosion) et chimiques propres aux surfaces continentales pour évaluer et anticiper les processus de transformation et de transfert de la matière à différentes échelles de temps et d'espace.

Enfin, le troisième enjeu identifié aborde les questions d'actions et de rétroactions entre le vivant et le non-vivant dans la compréhension des cycles des contaminants qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique. D'un point de vue sociétal, cet enjeu rentre dans le cadre de la préservation de nos ressources et de la remédiation des milieux contaminés. D'un point de vue scientifique, il s'agira de mieux appréhender les mécanismes couplés vivant/non-vivant impliqués dans l'écodynamique et l'écotoxicité des contaminants et notre capacité à représenter ces couplages à différentes échelles spatiales et temporelles. Des verrous de connaissance subsistent sur les effets des contaminants sur le long-terme lors d'expositions chroniques, les effets associés aux multi-stress (effets cocktails, changement climatique, antibiorésistance, etc.), le transfert des contaminants entre les différents compartiments de la zone critique, ou encore sur la temporalité des processus que ce soit au niveau expérimental ou théorique.



© Pierre Barre (CERES, Labo de Géologie de l'ENS)

# LA MATIÈRE ORGANIQUE DANS TOUS SES ÉTATS

## RÉSUMÉ GLOBAL

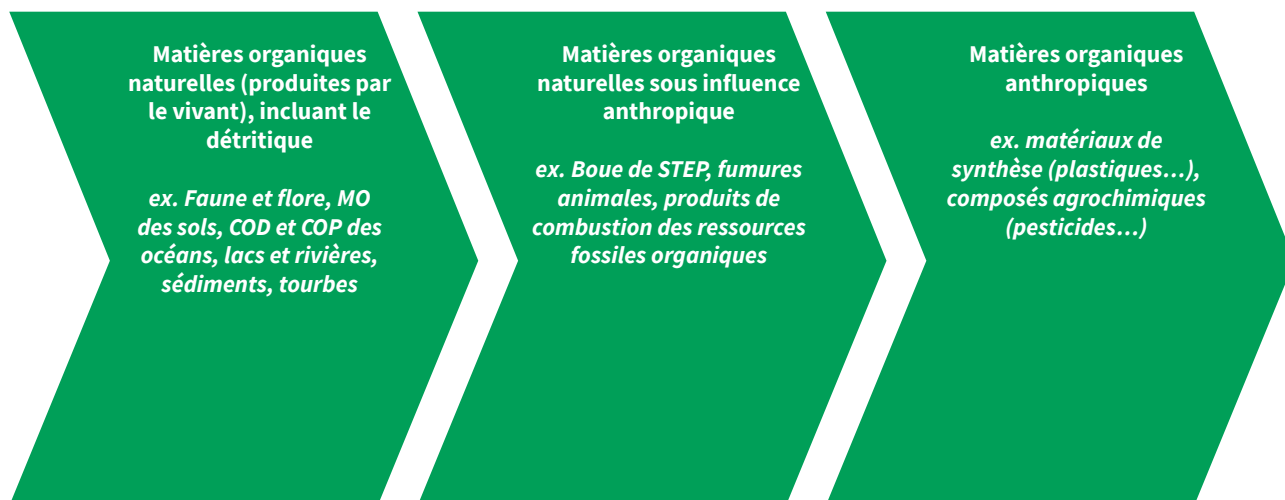
Les matières organiques jouent un rôle majeur dans de nombreuses questions environnementales de premier plan telles l'atténuation ou l'aggravation du changement climatique, la qualité des sols et les transferts de contaminants sur lesquelles ont porté nos travaux de prospectives. Pour chacune de ces questions, nous proposons dans ce document (1) un état des lieux des recherches françaises, (2) l'identification des forces, faiblesses, opportunités et menaces pour la communauté concernée et (3) des voies de recherches futures. Enfin, nous suggérons des pistes d'action qui pourraient permettre à la communauté intéressée par les matières organiques de progresser significativement dans les prochaines années sur ces sujets à forts impacts sociétaux.

## CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET ENJEUX

Les matières organiques (définies comme des molécules formées très majoritairement de C et H et pouvant contenir des hétéroatomes tels O, N, P et S) sont constituées de molécules d'une immense diversité, d'origines variées et se retrouvent dans tous les compartiments des surfaces continentales (Figure 1). Leur rôle est déterminant dans plusieurs problématiques environnementales majeures. En effet, assurer la sécurité alimentaire, comprendre et réguler le cycle du C, reconquérir la qualité des eaux ou

encore favoriser le développement de nouvelles matières premières carbonées passent par l'accroissement de nos connaissances sur les sources, les dynamiques et les réactivités des molécules organiques naturelles et anthropiques. Cette implication dans de grands enjeux sociétaux fait de ces objets, dont l'étude biogéochimique à des échelles spatiales très diverses (du nanomètre au globe) demeure un enjeu, un terreau fertile à l'interdisciplinarité. Les matières organiques constituent un objet d'étude clairement fédérateur pour les différents organismes de recherche français travaillant sur les SIC.

Figure 1 : Diversité d'origine des matières organiques



Les enjeux et questions scientifiques associés aux matières organiques couvrent des champs de réflexion très vastes. Les animateurs ont fait le choix de restreindre ces réflexions dans le cadre de cet exercice de prospective aux trois champs de recherche suivants: (1) matières organiques et climat; (2) matières organiques et qualité des sols; (3) matières organiques et pollutions. Lors du déroulement de l'atelier pendant les journées de prospectives, chacun de ces champs de recherche a été discuté par un groupe d'une douzaine de participants. Ce document présente, pour chacun des champs choisis, les axes de recherche existant en France; les forces, faiblesses, opportunités et menaces pour la communauté scientifique française; et enfin les pistes d'action et de recherches futures. Ce texte se base sur les conclusions de chacun des groupes, enrichies éventuellement par des contributions postées sur le site de la prospective. Un questionnaire a également été envoyé à la communauté travaillant sur les matières organiques en vue de dresser un panorama de la communauté scientifique française travaillant sur la MO. La synthèse des réponses à ce questionnaire est présentée ci-dessous.

Il a également été envoyé aux Directeurs d'Unités des UMR relevant de la section 30 du Comité national de la recherche Scientifique pour diffusion.

Cinquante-et-une réponses ont été reçues. Ces réponses montrent que la communauté provient d'organismes différents (CNRS, Universités, IRD, INRA, École d'Agronomie, IRSTEA, Instituts Techniques), les collaborations entre personnels de différents organismes étant la règle. Plus de la moitié des personnes ayant répondu (29/51) utilise des sites de suivi à long terme (SNO, ZA, SOERE, parcelles d'instituts techniques) pour leur recherche. Relativement peu (< 10 %) de personnes travaillent à la fois sur le milieu terrestre et le milieu aquatique ou sur le continuum terre/mer.

La communauté utilise des approches diverses et couvre les différentes échelles spatiales, du nanomètre au globe (Figure 2). La majorité des travaux est effectuée à l'échelle du m<sup>2</sup> ou de l'hectare. Outre l'analyse élémentaire sur échantillons bruts, la communauté utilise principalement des approches moléculaires et isotopiques. Une part significative de la communauté utilise la modélisation et quelques personnes mettent en œuvre les outils de télédétection.

## PANORAMA DE LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE FRANÇAISE TRAVAILLANT SUR LES MO

Le questionnaire a été envoyé sur les listes de diffusion du réseau matière organique (ResMO), de l'Association Française pour l'Étude des Sols (AFES) et de l'Association des Chercheurs Francophones en Géochimie Organique (FROG).

Figure 2: Synthèse des réponses au questionnaire reçues. Parmi les 51 réponses, 36 concernaient les écosystèmes terrestres et 17 les écosystèmes aquatiques (certaines personnes travaillant sur les deux). Les totaux sur les techniques utilisées et les échelles d'étude dépassent le nombre de réponses car souvent les chercheurs utilisent différentes techniques et travaillent à plusieurs échelles spatiales.

TECHNIQUES UTILISÉES	ÉCOSYSTÈMES TERRESTRES (N=36)					Total
	nano	m <sup>2</sup>	Parcelle	Paysage	Globe	
Télédétection				4	1	5
Modélisation	1	4	4	7	4	20
Analyses élémentaires	8	22	23	7	1	61
Microbiologie	4	11	7			22
Isotopie	9	13	14	4	2	42
Analyses moléculaires	8	16	11	7	1	43
<b>Total</b>	<b>30</b>	<b>66</b>	<b>59</b>	<b>29</b>	<b>9</b>	
	nano	m <sup>2</sup>	Parcelle	Paysage	Globe	
	Échelle d'étude					

TECHNIQUES UTILISÉES	ÉCOSYSTÈMES AQUATIQUES (N=17)					Total
	nano	m <sup>2</sup>	Parcelle	Paysage	Globe	
Télédétection		2	1	2	1	6
Modélisation	1	1	1	1		4
Analyses élémentaires	2	7	6	5	1	21
Microbiologie	2	3	2	1	2	10
Isotopie		1	1	1	1	4
Analyses moléculaires	3	9	6	6	2	26
<b>Total</b>	<b>8</b>	<b>23</b>	<b>17</b>	<b>16</b>	<b>7</b>	
	nano	m <sup>2</sup>	Parcelle	Paysage	Globe	
	Échelle d'étude					



## AXES DE RECHERCHE IDENTIFIÉS POUR CHACUN DES CHAMPS DE RECHERCHE CHOISIS

### **Matières organiques et Climat**

Cinq grands axes de recherche ont été identifiés par les participants.

#### *Dynamique de la séquestration et de la minéralisation des MO dans les différents compartiments des SIC (zones humides, sols, rivières et lacs, estuaires, zones côtières) et transferts entre ces compartiments*

Une communauté scientifique française importante et variée étudie la dynamique de la séquestration et de la minéralisation des MO dans les différents compartiments du cycle continental du C. La communauté est perçue comme nombreuse et en croissance sur les sols, de taille moyenne sur les estuaires, les rivières et le côtier et plus réduite sur les zones humides et les sols gelés. Plusieurs équipes travaillent également sur les transferts de MO entre ces compartiments, thématique perçue comme émergente. Le programme EC2CO, notamment sur le compartiment côtier, est stimulant pour ces recherches. L'intérêt des SNO pour ces études a également été relevé.

#### *Influence des forçages (climat, usages des sols et pratiques culturales) sur la quantité/qualité de la MO et rétroactions sur le climat*

La communauté travaillant sur ces sujets est nombreuse mais relativement dispersée. Elle est constituée de personnes travaillant de l'échelle de la parcelle à celle du globe, avec des approches variées (caractérisation des matières organiques, télédétection, modélisation...).

#### *MO comme marqueur des changements climatiques*

Une communauté aborde les MO comme marqueurs des changements climatiques à différentes échelles de temps : échelle paléo (million au millier d'années), échelle du siècle et échelle de temps de l'évènement extrême. La communauté, notamment pour la partie étudiant les échelles de temps les plus courtes, est de taille plus réduite que pour les deux précédents axes.

#### *Conséquences des modifications induites par le climat sur les réseaux trophiques pour la décomposition de la MO*

Le changement climatique modifie les réseaux trophiques avec, en retour, des conséquences sur la décomposition des MO. Ce thème émergent est porté au niveau français par une communauté relativement réduite (venant essentiellement de l'écologie fonctionnelle).

#### *MO comme support de service écosystémique*

La MO est impliquée, entre autres, dans le service de régulation du climat (via la séquestration de C). Ceci pourrait constituer un sujet d'étude pour les économistes ou constituer un terrain fertile pour des collaborations avec les SHS.

### **Matières Organiques et qualité des sols**

Une dizaine d'axes de recherche ont été identifiés. Cette grande variété d'axe de recherche provient de l'étendue du sujet sur la qualité des sols et les nombreux services écosystémiques dans lesquels sont impliquées les MO. Dans ce sens, le premier axe de recherche identifié par un grand nombre de participant porte sur la définition des indicateurs de la qualité des sols. Ensuite, les différents axes de recherche ont été regroupés autour de la dynamique des MO, des organismes du sol et des paramètres physiques du sol (structure, eau).

#### *Comment définir les indicateurs de la qualité des sols ?*

Bien que cette question soit traitée depuis plusieurs années et par une communauté de chercheurs conséquente, elle reste d'actualité. En effet, la définition de ces indicateurs selon des objectifs et des perceptions de qualité des sols différents en fonction des acteurs et des contextes reste compliquée. Définir et mesurer ces indicateurs est toujours un axe de recherches majeur. Un travail important reste à faire dans le domaine de la métrologie et des monitoring associés.

#### *La dynamique des MO*

Cet axe de recherche est historiquement bien représenté dans la communauté scientifique, aussi bien dans les sols tempérés que tropicaux. Essentiellement porté par des biogéochimistes, cet axe s'ouvre depuis quelques années vers les écologues microbiens et implique de plus en plus le recyclage des nutriments à travers le couplage des cycles C, N et P et, plus récemment, les mécanismes liés à la stœchiométrie écologique. Il existe aussi une communauté scientifique, bien que peu nombreuse, s'intéressant à la dynamique des MO dissoutes dans les sols et ses transferts dans les bassins versants.

#### *Les organismes du sol*

La communauté s'intéressant aux organismes du sol est majoritairement composée de chercheurs étudiant l'impact de la qualité de sols, ou simplement de son occupation, sur la diversité microbienne. Une communauté bien installée quoique peu nombreuse s'intéresse aussi à la faune (vers de terre...). Ces communautés assez dispersées se regroupent actuellement autour d'un axe de recherche émergent au-



tour de la notion de réseau trophique. Au sein de cet axe sur les organismes des sols, une communauté scientifique s'intéresse aux racines des plantes et à leurs interactions avec la qualité des sols. D'autres organismes tels que les algues, les archées, les virus, ou structures tels que les biofilms, ou encore l'implication des MO dans des fonctions de communication sont autant d'objets de recherche particulièrement prometteurs pour définir la qualité des sols.

#### **Les propriétés physiques des sols**

L'impact de la MO sur la qualité des sols, leur structure, leur sensibilité à l'érosion et sur la dynamique de l'eau dans le profil de sols est toujours très étudié par la communauté des sciences du sol. Peu de participants dans ces domaines étaient présents lors de l'atelier.

#### **Matières organiques comme polluant ou vecteur de polluants**

Trois grands axes de recherches ont été identifiés par les participants.

#### **Étude des caractéristiques (typologie, structure, sources...) de la matière organique naturelle (MON) pour comprendre la dynamique des contaminants dans l'environnement**

Cet axe de recherche regroupe les thématiques de l'interaction des MON avec les contaminants anthropiques en fonction de la diversité retrouvée dans le milieu naturel. Cela couvre l'influence des MON sur le transport des contaminants ainsi que l'influence des MON sur le devenir des contaminants, en particulier le rôle des MON dans la toxicité et biodisponibilité des contaminants. Cet axe implique une recherche intégrée intra/inter-compartiments (Géo/Bio/Atmo/Hydrosphère), c'est à dire au niveau de la zone critique, la question des transferts entre les différentes « sphères » étant jugée comme particulièrement pertinente. Les participants à l'atelier ont jugé à l'unanimité que ce thème de recherche repose sur une grande communauté de recherche en France et que c'est une thématique historique qui doit être poursuivie et soutenue, représentant des enjeux clés dans le contexte des changements globaux actuels. Cette communauté est relativement bien structurée et dynamique. Comme pour l'axe 1, il est essentiel pour la communauté d'être à même de pouvoir mesurer, quantifier et discriminer ces différents contaminants au sein même de chacun des compartiments étudiés. Ceci passe par le déve-

loppement et la combinaison de systèmes de monitoring *in situ* et dédiés permettant la mise en place d'une réelle « big » base de données biogéochimique. C'est une étape clé afin de nous permettre de statuer sur la pertinence d'un modèle de transfert global autorisant les changements d'échelle.

#### **Étude de l'interaction/dynamique des organismes biologique sur la dynamique des contaminants à plusieurs échelles (ex. biofilm, micro/macrofaune du sol, plantes)**

Cet axe de recherche porte sur le rôle des organismes comme vecteur mais aussi transformateurs des contaminants dans les milieux. Ils jouent le rôle de « producteurs » de MO tout en remobilisant des éléments contaminants. Cet axe de recherche inclut donc toutes les dimensions liées à la remédiation des sites pollués. Dans les exemples cités, reviennent souvent la bioremédiation et l'ingénierie écologique au sens large (phytoremédiation, phytoextraction...). Cet axe de recherche regroupe l'idée d'études *in situ* mais implique également la nécessité d'augmenter les expérimentations en laboratoire sous conditions contrôlées. Les participants ont jugé cette thématique comme étant émergente, particulièrement cruciale mais basée actuellement sur une communauté trop réduite ayant besoin de se structurer et nécessitant un soutien pour son développement futur.

#### **Développement des modèles et outils de modélisation**

Ce troisième axe de recherche prospectif porte essentiellement sur la modélisation. Elle regroupe les domaines de la modélisation basés sur l'expérimentation que ce soit *in situ* ou en milieu contrôlé au laboratoire. Cet axe de recherche doit permettre de progresser dans la simulation des dynamiques et de leur évolution dans le temps en conditions changeantes. Cela doit permettre également de réaliser un changement d'échelle. Il a été noté également un intérêt pour la modélisation à l'échelle moléculaire. Thématique historique du corpus scientifique français sur la matière organique, cette recherche est menée par une petite communauté scientifique. La valorisation de ces travaux et les échanges avec les différentes thématiques liées à l'étude de la MO doivent être largement favorisés. Il est conseillé d'augmenter l'utilisation de la modélisation.

## FORCES, FAIBLESSES, OPPORTUNITÉS ET MENACES POUR LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE FRANÇAISE

La figure 3 synthétise les forces, faiblesses, opportunités et menaces identifiées par les 3 groupes. Comme les réponses se recoupent assez largement, la figure 3 est valable pour chacun des thèmes. Quelques spécificités ont été également mentionnées.

Figure 3 : Forces, faiblesses, opportunités et menaces identifiées par les 3 groupes. Les phrases en gris et en violet sont spécifiques aux groupes « MO et polluants » et « MO et qualité des sols » respectivement.

### FORCES

Communauté structurée, notamment grâce à l'existence de réseaux dynamiques (ResMO, EcotoxicoMic...)  
 Communauté diverse venant de différents organismes (ex. CNRS, INRA, IRSTEA, IRD, CIRAD, Universités...), travaillant dans des contextes variés  
 Forte capacité analytique (isotopie, plateforme d'analyses...)  
 Outils appropriés (flotte, observatoires, ZA, RMQS, accès aux petits et grands instruments)  
 Pluridisciplinarité et interdisciplinarité, couplage mesures/expérimentation/ modélisation, couplage d'échelle  
 EC2CO, un programme structurant  
 Problématique reconnue

Sujets à la mode (ex. changement climatique, prise en compte des services écosystémiques rendus par les sols)  
 Opportunités de financements (Europe, EC2CO, REGEF, MISTRALS; ANR non mentionnée!!!)  
 Echanges entre communautés, y compris au niveau international à travers des réseaux structurés  
 Développement des sciences participatives  
 Profiter de l'appartenance à plusieurs organismes  
 Orientation nationale forte au travers des pôles techniques

### OPPORTUNITÉS

### FAIBLESSES

Fragmentation/cloisonnement thématique de la communauté (ex. déconnexion chercheurs terrestres et marins)  
 Problèmes pratiques: Harmonisation des protocoles, des outils d'analyse, gestion des échantillons, absence de base de données, faiblesse du partage de données  
 Financement (faiblesse, durée, baisse du soutien de base, sujets non éligibles à l'ANR)  
 Vieillesse du parc analytique et manque d'outils de terrain  
 Manque de recherche en modélisation (moléculaire, transfert)  
 Manque de recherche sur l'interaction avec la partie biotique ainsi que sur l'utilisation couplée des approches isotopiques et moléculaires  
 Absence d'ouverture d'esprit sur les sols liée à l'histoire de la discipline. Le sol n'est pas qu'agricole.  
 Le sol est rarement vu dans son ensemble (profil entier, dans le paysage et en interaction avec d'autres compartiments)

Poursuite de la baisse des recrutements et des financements, notamment pour la recherche fondamentale et l'achat d'équipement  
 Financements restreints ou trop ciblés, difficulté de faire financer les projets à risque et manque de coordination entre organismes financeurs  
 Dilution dans des communautés différentes/Fermeture des communautés  
 Perte de l'expertise technique (départ en retraite, manque de personnels techniques)  
 Poursuite de la multiplication des structures créant un paysage peu lisible (OHM, ZA, GIS, LTER, SNO...)  
 Manque de compréhension des parties prenantes  
 Transfert de la science vers les entreprises et manque de recherche publique appliquée

### MENACES

## PISTES D'ACTION ET DE RECHERCHES FUTURES

### Matières organiques et Climat

#### *Perspectives de structuration*

L'initiation d'un projet collaboratif associant écologues et géochimistes a été proposée. Un tel projet permettrait de capitaliser sur l'attrait et la pertinence d'une approche pluri-disciplinaire autour de questions liant MO et climat.

Il existe à l'heure actuelle peu ou pas d'actions de science citoyenne sur le sujet MO et climat. Il serait sans doute opportun de profiter de la fenêtre actuelle de plus grande visibilité de la MO auprès du grand public pour initier de telles actions.

Bien que la thématique MO et climat soit mentionnée comme prioritaire à l'ANR, ce guichet n'est pas considéré comme intéressant par une grande partie de la communauté. Une structure dédiée à la MO dans l'Allenvi permettrait peut-être de réaliser un lobbying plus actif à l'ANR pouvant déboucher sur des taux de succès raisonnables. En revanche, EC2CO est perçu comme un programme très structurant et a été plébiscité par les participants.

#### *Perspectives scientifiques*

Les perspectives scientifiques sont nombreuses et reprennent en partie les axes identifiés lors de l'état des lieux. C'est assez logique dans la mesure où la recherche s'inscrit nécessairement dans un temps long.

Une meilleure quantification des transferts latéraux de MO des sols vers les rivières puis du devenir des MO transportées vers les estuaires constitue clairement un verrou pour notre compréhension du cycle continental du C. Une utilisation judicieuse des données fournies par le RBV ou certaines ZA pourrait permettre des progrès significatifs sur ce sujet. Au-delà de ces inventaires quantitatifs, la prédiction des changements de stocks de C organique du sol () constitue également un enjeu majeur. Les modules de dynamique du C du sol utilisés par les modèles climatiques souffrent notamment d'une initialisation rendant très mal compte du temps de résidence du C dans les sols. Pour lever ce verrou, le développement de méthodes robustes, rapides et peu

coûteuses permettant de quantifier en routine le stock de C organique du sol et d'estimer son temps moyen de résidence serait nécessaire. Les techniques de spectroscopie infrarouge et les analyses thermiques sont des candidats naturels dont le potentiel mériterait d'être évalué.

En dépit de certaines avancées, notre connaissance des interactions MO/communautés biologiques pourrait être rendue plus explicite. Une telle formulation serait particulièrement nécessaire pour mieux comprendre la modification de la cinétique de minéralisation des MO en environnement changeant. Les progrès actuels de la génomique environnementale devraient permettre des avancées déterminantes dans les années à venir.

Depuis une vingtaine d'années, la quête de l'introduction de plus de mécanismes dans les modèles de dynamique du C des sols n'a fait que peu de progrès. Pourtant, l'intégration de plus de données provenant de dispositifs de suivi des stocks de C du sol de plus en plus nombreux pourrait permettre des avancées notables. Une réflexion collective et pluridisciplinaire sur la façon d'intégrer les mécanismes fins dans des modèles globaux serait sans doute nécessaire. Cette réflexion devrait aussi s'appuyer sur la prise en compte des phénomènes d'échange dans des compartiments sous-jacents tels que les horizons géologiques et aquifères superficiels.

Malgré la montée en puissance du pôle THEIA, la télédétection reste un outil peu utilisé par la communauté travaillant sur la dynamique du carbone. Une plus grande utilisation de cet outil serait sans doute fructueuse.

En ce qui concerne l'enseignement, intégrer les nouveaux concepts de biogéochimie des MO au cursus des étudiants est nécessaire. Aujourd'hui encore, beaucoup d'étudiants sortent de nos formations avec la vision géomacromoléculaires (substances humiques) et n'ont pas été informés des autres concepts.

## Matières Organiques et qualité des sols

Les pistes d'actions et de recherches futures proposées par les participants à l'atelier se distribuent en deux groupes.

### *Recherche spécifique sur des points particuliers de la qualité des sols*

- Renforcer les axes de recherche émergents identifiés précédemment, c'est-à-dire par le développement de l'étude des cycles CNP notamment par la stœchiométrie écologique, l'étude des MO dissoutes et leur mobilité dans le profil de sol et/ou les bassins versants, l'étude des organismes encore peu abordés (algues, archées) et des interactions (trophiques ou non) entre ces organismes
- Favoriser les recherches dans des contextes variés. Étudier la qualité des sols suite à des événements climatiques extrêmes dans des sols peu étudiés, par exemple des sols tropicaux, des cryosols, des technosols, des anthroposols, des sols urbains, ou sur l'ensemble des profils de sols y compris en profondeur (> 30-40 cm).

### *Recherche plus globale et intégrative de la qualité des sols*

Les recherches sur les liens entre la diversité biologique des sols ou les traits des populations d'organisme des sols et leurs fonctions sont à encourager afin d'avoir une idée plus intégratrice de la qualité des sols en lien avec la biodiversité. Dans ce sens, les recherches émergentes sur les réseaux trophiques et les MO comme molécules de communication sont à poursuivre et développer.

Bien que la recherche d'indicateurs plus ou moins globaux de la qualité des sols soit active dans la communauté de science du sol, il existe peu d'actions citoyennes ou de recherches participatives avec les différents acteurs concernés par la qualité des sols. La perception de la qualité des sols selon les contextes et le besoin d'indicateurs par ces acteurs sont encore peu connus des scientifiques étudiant plus classiquement le fonctionnement des sols, tels que ceux participant à l'atelier. Le développement de recherche participative pour définir les indicateurs de la qualité des sols avec les décideurs et les agriculteurs a été perçu

comme déterminant. Ce point pourrait constituer un sujet d'étude fertile pour des collaborations avec les SHS, et des actions auprès d'un public de plus en plus sensible à la qualité des sols.

### **Matières Organiques comme polluant ou vecteur de polluants**

Dans ce thème de recherche, les participants ont proposé plusieurs temporalités pour la mise en place d'action et de recherches futures.

Dans les «victoires rapides» («quick victories», à très court terme), il est proposé l'ouverture à tous les laboratoires des plateformes analytiques (isotopiques, moléculaires). Par ouverture, il était mentionné la publicisation de leur existence mais aussi la facilitation de leur accès à tous les laboratoires français. Cela permettrait une meilleure efficacité pour les chercheur(e)s dans cette thématique tout en favorisant l'interdisciplinarité. Toujours dans une temporalité relativement courte (3-5 ans), il paraît possible de développer et de mettre en place des capteurs de suivi sur le terrain de manière généralisée et coordonnée. L'étude des processus de transfert et le rôle de la MON (en fonction de sa nature et son état) dans la spéciation des polluants doit être favorisée également à très court terme. Finalement, les participants jugent que l'étude de la toxicité et de la biodisponibilité est également une thématique devant rentrer dans cette temporalité. À moyen terme (10-15 ans), les participants ont proposé plusieurs sous-thèmes prospectifs à développer :

- «Omique» appliqué à la MON
- Rôle du vivant dans le devenir des contaminants (sols...)
- Changement d'échelle régional/national
- Modèles moléculaires

Le groupe de réflexion souhaite, également à moyen terme, une plus forte implication de la société civile dans la recherche (science participative) et le développement d'une base de données libre et unique.

À long terme (20 ans et plus), la communauté doit se fixer comme objectifs de parvenir à faire des bilans globaux sur la MON, des études de transferts multi-compartiments mais aussi de travailler sur des modèles couplés MON et pol-

luants. Finalement, l'effet du climat et de son évolution doit être étudié pour comprendre son impact sur l'interaction entre MON et polluants.

Finalement il a été recommandé de poursuivre des efforts de recherche en continu sur la caractérisation moléculaire du C organique et de travailler sur la triple intégration modèle-terrain-labo, sur les interactions communautés microbiennes – polluants et sur le rôle de la MO dans les transferts des contaminants émergeant aux interfaces.

## QUELLES STRUCTURES, QUELLES FORMATIONS ET QUELS MOYENS POUR L'AVENIR...

### Structuration

Les priorités de recherche sur la MO, même en restreignant le champ traité à trois enjeux comme nous l'avons fait, sont nombreuses. Aborder les grands enjeux énoncés ci-dessus nécessite une coopération entre différentes spécialités des chercheurs SIC. À ce titre, il semble essentiel de poursuivre la structuration de la communauté française, déjà effective à travers des collectifs complémentaires et en interaction tels RESMO (RESeau Matières Organiques), FROG (Association des Chercheurs Francophones en Géochimie Organique), CARBOSMS (CARBOne des Sols, Mécanismes de Stabilisation), GRET (Groupe de Recherche en Écologie Trophique), ou encore CASA (Carbone des Sols pour une Agriculture durable en Afrique; réseau de chercheurs essentiellement français et de 11 pays d'Afrique). Cependant, les collaborations entre biogéochimistes et écologues doivent être accentuées. En effet, les publics naturels de différents congrès français importants comme les Journées d'Écologie Fonctionnelle, des événements RESMO ou des Journées Nationales d'Étude du Sol sont assez disjoints. Par ailleurs, les collaborations avec les SHS sont balbutiantes, il faudrait donc trouver un moyen de mieux interagir avec la communauté SHS intéressée (économistes, sociologues, politologues, juristes, etc.). Une nouvelle structuration autour de la MO pourrait prendre la forme d'un GDR à la condition de s'assurer que ce GDR apporte une réelle plus-value à la structuration déjà existante.

### Chantiers et moyens d'observation

La production de données via différents réseaux (portés par divers instituts) en France est conséquente (RMQS, RENE-COFOR, SNO, ZA, OHM, Cyber-carothèque nationale (C2FN), etc.). Bien qu'elle l'utilise fortement, la communauté française travaillant sur les MO ne tire pas forcément pleinement bénéfice de cet effort de production de données et d'échantillonnage. En effet, la communauté ne connaît pas nécessairement l'existence de ces données et collections d'échantillons ainsi que les conditions de leur accessibilité, et inversement certains responsables de ces réseaux peuvent être frustrés de la trop faible utilisation de celles-ci. L'ALLENVI pourrait jouer un rôle pour faciliter l'utilisation optimale de ces ressources très précieuses pour la communauté.

De plus, de nombreux résultats de caractérisation des MO sont déjà acquis, notamment sur les sites des différents réseaux. Il serait précieux que ces résultats (une fois publiés) puissent être archivés et rendus disponibles au sein d'une base de données indiquant les métadonnées et le protocole d'acquisition des données.

### Les outils programmatiques

En ce qui concerne la programmation de la recherche, même si les baisses de crédits alloués à l'AO EC2CO inquiètent la communauté « matières organiques », cet AO est perçu comme un outil très précieux. En revanche, il apparaît nécessaire de réorienter des fonds de l'ANR vers des thématiques « écologique, environnementale » qui ont du mal à trouver actuellement des financements sans soutien d'un partenaire industriel comme en attestent les taux de succès ridiculement bas à ce guichet. Enfin, la recherche sur les MO peut contribuer à la réalisation de plusieurs objectifs du développement durable (ODD), notamment les ODD 2 (« Faim zéro »), 6 (« Eau propre et assainissement »), 13 (« Mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques »), 14 (« Vie aquatique ») et 15 (« Vie terrestre »). À ce titre, la communauté pourrait mieux profiter des fonds « Belmont Forum » ou « H2020 ». Le succès aux AOs étant, au moins en partie, une question de méthode et de lobbying, un accompagnement fort de la communauté vers ces guichets est nécessaire pour qu'elle ne passe pas un temps considérable à répondre de manière infructueuse.



### **Relations avec les porteurs d'enjeux (décideurs publics, collectivités) et grand public**

La communauté participe à des actions de vulgarisation ou d'échanges avec le grand public. La communauté participe également ponctuellement à des activités d'expertise pour éclairer la décision publique. À titre d'exemple, une expertise sur le 4 pour 1000 et une expertise de l'EFESE (Évaluation Française des Écosystèmes et des Services Écosystémiques) sur les différents puits de C naturels français sont en cours. Toutes ces actions pourraient être renforcées. Cependant, la majorité de la communauté ignore l'existence

de ces expertises et la manière d'y participer. Il y a donc dans la communauté scientifique intéressée par les MO un réservoir de connaissances sous-exploité qui pourraient être mobilisé par l'ALLENVI, les instituts et les universités pour l'expertise et l'appui aux politiques publiques.

### **RÉSUMÉ EXÉCUTIF**

#### **6 recommandations :**

- **Mieux intégrer les progrès scientifiques rapides réalisés dans d'autres champs disciplinaires (par ex. techniques -omiques et télédétection)**
- **Optimiser l'utilisation des opportunités fournies par les différents chantiers et moyens d'observation par une communauté pluri-instituts**
- **Permettre aux jeunes générations talentueuses d'(enseignant-)chercheurs, ingénieurs et techniciens d'être recrutées sur des postes permanents**
- **Réfléchir à la création d'un GDR « Matières Organiques »**
- **Développer une activité de lobbying pour réorienter des fonds nationaux (ANR) et capter une part plus significative des fonds « Belmont Forum » ou européens**
- **Développer les activités d'expertise pour les porteurs d'enjeux**



© Fatima Laggoun (ISTO, CNRS)

# INTERFACE ENTRE LA BASSE ATMOSPHÈRE ET LES SURFACES CONTINENTALES

## RÉSUMÉ GLOBAL

L'interface entre l'atmosphère et les surfaces continentales est un lieu d'échanges importants d'énergie et de matière liquide, solide ou gazeuse. Aussi, comprendre et quantifier les interactions entre surfaces et atmosphère est un enjeu de premier ordre pour essayer d'anticiper au mieux les conséquences de nouvelles et futures évolutions des surfaces continentales, que ce soit sous l'effet de l'évolution du climat ou de modifications de l'usage des sols. Des processus spécifiques se produisent à l'interface surface-atmosphère, rendant nécessaire l'étude de cette interface non comme un simple lieu de transfert, mais en tant qu'objet propre. S'attacher à identifier et quantifier les processus opérant dans le continuum sol-eau-plante-atmosphère doit permettre de comprendre ce qui contrôle réellement les flux échangés et donc d'apporter des réponses fondées aux questionnements des décideurs publics. De façon générale, les questions d'intérêt concernent l'évaluation des rôles respectifs du changement climatique, d'une part, et de l'usage des sols d'autre part, sur les modifications des flux entrants et sortants d'énergie, d'eau et d'espèces-traces gazeuses, dissoutes ou particulaires.

## PRÉAMBULE

Aujourd'hui, la composition de l'atmosphère change, le climat évolue et l'usage des terres transforme profondément les milieux où nous vivons. Des enjeux sociétaux importants sont associés à ces changements (gestion des ressources en eau et en sol, impact climatique, disponibilité alimentaire, santé publique...). Face à cela, notre compréhension des interactions entre les surfaces continentales et l'atmosphère reste très incomplète et constitue l'une des principales limitations au développement d'approches intégrées permettant d'évaluer le fonctionnement de systèmes allant de la parcelle à la planète Terre et de livrer des diagnostics fondés en réponse aux questions qui nous sont adressées.

La communauté nationale a, en tenant compte de ses spécificités, identifié lors de l'exercice de prospective un certain nombre d'enjeux et de milieux sur lesquels elle propose d'intervenir prioritairement dans les prochaines années. Elle a également essayé de définir les moyens programmatiques et techniques qu'il lui semble nécessaire de maintenir, acquérir, mettre en place si l'on souhaite aborder certaines de ces priorités dans les prochaines années.

## CONTEXTE ET ENJEUX SCIENTIFIQUES

L'interface entre l'atmosphère et les surfaces continentales est un lieu d'échanges importants d'énergie et de matière liquide, solide ou gazeuse. Aussi, comprendre et quantifier les interactions surface-atmosphère est un enjeu de premier ordre pour essayer d'anticiper au mieux les conséquences de nouvelles et futures évolutions des surfaces continentales, que ce soit sous l'effet de l'évolution du climat ou de modifications de l'usage des sols.

Les surfaces continentales sont aussi le lieu de vie des populations humaines. Elles sont en particulier le lieu de production de la plus grande partie de l'alimentation et celui où est concentrée la totalité de l'habitat. La maîtrise du fonctionnement énergétique et hydrique des surfaces est donc un enjeu majeur pour les gestionnaires et les aménageurs. En effet, les changements d'organisation et de fonctionnement des paysages ont un impact fort sur le climat et les cycles biogéochimiques (modifications des flux d'énergie, d'eau, de gaz à effet de serre et d'espèces-traces), tant à court qu'à long terme. À titre d'exemple, l'agriculture consomme aujourd'hui, au niveau mondial, environ 70 % de la ressource

en eau et joue de ce fait un rôle critique dans le cycle hydrologique.

Les processus qui pilotent les interactions entre les surfaces continentales (y compris la cryosphère et les lacs) et l'atmosphère, tant dans leur dimension naturelle que perturbée, doivent donc faire l'objet d'une attention particulière. En effet, des processus spécifiques se produisent à l'interface surface-atmosphère et cela nécessite d'étudier cette dernière, non comme un simple lieu de transfert, mais en tant qu'objet propre. S'attacher à identifier et quantifier les processus opérant dans le continuum sol-eau-plante-atmosphère reste le seul moyen permettant de comprendre ce qui contrôle réellement les flux échangés (et donc le seul moyen d'apporter des réponses fondées aux questionnements des décideurs publics).

De façon générale, **les questions d'intérêt concernent l'évaluation des rôles respectifs du changement climatique d'une part, et de l'usage des sols d'autre part, sur les modifications des flux entrants et sortants d'énergie, d'eau et d'espèces-traces gazeuses, dissoutes ou particulières.** La démarche permettant de répondre à ces questions vise à comprendre et quantifier aux échelles de temps et d'espace adéquates les processus mis en jeu.

## ÉTAT DE L'ART ET VEROUS SCIENTIFIQUES

La complexité particulière de l'analyse des échanges entre surface et atmosphère vient en grande partie des **hétérogénéités spatiales de la surface** (en nature, en couverture, en type d'usage...). En fait, dès que l'on s'éloigne de l'échelle intra-parcellaire, échelle privilégiée pour la mesure directe de ces échanges, la difficulté d'intégration de ces hétérogénéités à des échelles plus larges limite notre capacité à décrire l'évolution biologique, physique ou chimique des milieux continentaux. En effet, pour les échelles supérieures (locale, sub-régionale, régionale, continentale voire globale), les effets de ces hétérogénéités doivent être intégrés alors que l'on connaît mal en général les lois, processus, fonctions de moyennage ou d'agrégation permettant d'effectuer ces intégrations. En plus de l'hétérogénéité spatiale, **les surfaces évoluent également au cours du temps** (notamment en termes de structure et d'organisation du paysage). Cette dynamique peut induire des modifications de flux ou de fonctionnement et doit donc être également prise en compte. Des verrous devront donc être levés en ce qui concerne les changements d'échelles, tant spatiales que temporelles, *via* notamment le développement d'outils variés (méthodes statistiques d'agrégation/désagrégation,

modélisations imbriquées, utilisation de produits de télé-détection à différentes résolutions...).

Si la fluidité du milieu atmosphérique le rend plus homogène spatialement que les surfaces continentales, cette fluidité induit une autre source de complexité liée à une variabilité temporelle très forte de ses grandeurs caractéristiques, tant à basse qu'à haute fréquence, notamment en raison des processus turbulents. Cette variabilité requiert donc une attention toute particulière pour l'étude des processus rapides, qu'ils soient météorologiques (comme les orages ou les coups de vent) ou chimiques. Nous avons appris ces dernières années que **des événements rares mais dont l'intensité est exceptionnelle peuvent fortement affecter le bilan global de certains échanges de matière ou d'énergie.**

L'ensemble de ces éléments explique la forte priorité mise ces dernières années sur les Services Nationaux d'Observations (SNO) et leur réorganisation au travers d'infrastructures de recherches comme ICOS (Integrated Carbon Observation System), OZCAR (Observatoire de la Zone Critique, Applications, Recherche) ou ANAE-FR (Analyses et Expérimentations sur les Écosystèmes-France). En effet, les observations réalisées sur de longues périodes permettent d'acquérir des données régulières, fiables et spatialisées afin notamment d'étudier les tendances évolutives, les éventuelles ruptures d'équilibre, les événements rares ou extrêmes. Les sites sur lesquels sont implantés ces SNO autorisent en outre la réalisation complémentaire d'expérimentations dont le but est d'évaluer l'impact à long terme de certains facteurs environnementaux, de modes d'occupation ou de gestion des ressources que l'on impose ou contrôle.

Comme mentionné précédemment, de nombreux défis demeurent aussi en ce qui concerne l'acquisition d'une meilleure connaissance de certains processus, qui permettrait de quantifier plus correctement les flux atmosphériques «entrant» et «sortant» sur les surfaces continentales (par exemple une meilleure quantification des émissions biogéniques via des modèles moins empiriques et décrivant de façon plus déterministe les liens entre émissions, sol et climat, ainsi qu'une amélioration de la représentation des processus de dépôts secs et occultes – brouillards, gouttelettes nuageuses –, notamment en interface avec la végétation). Mieux comprendre ces processus nécessite d'abord de les observer et les quantifier, et l'on se heurte ici, au moins pour partie, à des difficultés expérimentales importantes: la mesure des flux est bien plus complexe que celle de la concentration d'une espèce et sa représentativité pour des milieux aussi hétérogènes que les surfaces continentales est souvent limitée.

Cet ensemble de complexités fait qu'aujourd'hui, la façon dont nous pouvons décrire les interactions entre les surfaces continentales et l'atmosphère reste un des principaux facteurs limitant notre compréhension de l'évolution de l'environnement, du climat et des cycles biogéochimiques, ces interactions étant mal prises en compte dans les modèles régionaux et globaux, qu'ils soient climatiques ou biogéochimiques. Par exemple, la simple modélisation des dépôts à partir des émissions ou par extrapolation spatiale des retombées au sol, donne des résultats divergents à l'échelle nationale... Réaliser un « vrai » couplage de modèles allant du transport atmosphérique jusqu'à l'impact sur les écosystèmes en passant par le dépôt atmosphérique, le transfert au travers du couvert végétal et le transfert au sein des sols constitue, pour la communauté internationale, un des grands défis des prochaines décennies mais aussi une obligation si nous voulons être à même de prédire le rôle des changements climatiques et autres impacts anthropiques sur les surfaces continentales.

### PRIORITÉS SCIENTIFIQUES POUR LES ANNÉES À VENIR

L'identification des priorités mentionnées ci-dessous repose sur les contributions apportées tout au long de l'exercice de prospective et résultent à la fois du croisement (I) de sujets sur lesquels il y a de forts questionnements scientifiques ou enjeux, (II) de compétences établies dans la communauté nationale laissant penser que les contributions qui seraient apportées pourraient être de grande valeur et (III) d'une motivation suffisante de la communauté autour de ces questions. Elles ne sont donc pas exhaustives.

Les bactéries du sol jouent un rôle clé dans **les échanges d'azote avec l'atmosphère**. En effet, certaines bactéries ont la capacité de fixer l'azote atmosphérique en opérant une réduction de celui-ci sous forme d'ammoniac. Des bactéries nitrifiantes vont ensuite transformer celui-ci en nitrates assimilables par la végétation. Lorsqu'ils ne sont pas recyclés, ces nitrates sont ensuite décomposés par les bactéries anaérobies du sol et cette décomposition conduit au retour dans l'atmosphère de l'azote sous la forme de divers composés azotés: azote moléculaire, protoxyde d'azote ( $N_2O$ , un puissant gaz à effet de serre) et, pour une plus petite fraction, sous forme d'oxydes d'azote ( $NO_x = NO + NO_2$ ). Les échanges d'azote entre l'atmosphère et le sol sont très importants et les émissions naturelles de  $NO_x$  sont, quant à elles, environ dix fois supérieures à celles résultant des acti-

vités humaines (chauffage, transport...). Les zones humides naturelles ou artificielles (incluant les lacs et les barrages) contribuent aussi à ces émissions, mais elles sont mal quantifiées aux différentes échelles. De plus, dans un contexte de changement global leur extension et leur occurrence évoluent rapidement (assèchement en zone chaudes, expansion en zones boréales, zones côtières, émergence comme ressources en eau en zone agricole, etc.). Outre l'azote, elles contribuent aux émissions d'autres gaz à effet de serre ( $CH_4$ ,  $CO_2$ ).

Le sol et la phyllosphère ne sont plus les seuls compartiments où l'on s'intéresse aux bactéries: l'étude des **bioaérosols** au sens large (bactéries, mais aussi virus, archées, champignons, pollen...) prend de plus en plus d'importance. Les raisons de s'y intéresser sont nombreuses et touchent plusieurs domaines, dont la santé environnementale (émission, transport et dépôt de pathogènes végétaux et animaux, qualité de l'air, bioterrorisme...), le fonctionnement des communautés microbiennes (processus d'interface, aérosolisation des microorganismes, abondance et diversité, rôle du microbiote aérien dans le fonctionnement des écosystèmes...), la biodiversité (transport de gènes par le vent), voire les impacts climatiques (rôle des bactéries dans la formation des nuages et les précipitations). Le développement de méthodes de mesure des flux d'émission et de dépôt, l'évaluation du transport à courte et longue distance, les conditions de survie des microorganismes dans l'atmosphère et leur rôle sur la physico-chimie de l'air, les flux de gaz traces et composés organiques volatils constituent autant de priorités scientifiques.

Évaluer la capacité actuelle et future des écosystèmes terrestres à stocker du carbone nécessite de quantifier séparément et à grande échelle les flux de photosynthèse et de respiration. Force est de constater que les approches diagnostiques et les modèles climat-carbone développés à ces fins ont donné lieu à des résultats divergents en matière de distribution spatiale, de variations saisonnières et d'intensité des flux biosphériques, autant pour le présent que dans le futur. L'observation depuis l'espace de la fluorescence naturelle de la végétation (SIF) et celle depuis le sol et l'espace des variations saisonnières d'un homologue soufré du  $CO_2$ , l'oxysulfure de carbone (OCS), offrent de nouvelles perspectives afin de mieux contraindre à grande échelle l'activité photosynthétique des plantes. Les efforts en la matière devront être poursuivis voire amplifiés. Par ailleurs, l'ensemble des plantes vasculaires émet dans l'atmosphère des composés organiques volatils, ou COV (isoprène, mono



et sesqui-terpènes, etc.). Ces émissions représentent aujourd'hui encore près de 80 % des **émissions globales de COV dans l'atmosphère**. Très réactifs, ces composés contribuent très fortement, en relation avec les oxydes d'azote, d'une part à la formation d'ozone et d'autre part à la formation d'aérosols organiques secondaires. Les déterminants de ces échanges devront être mieux identifiés et quantifiés et leur évolution dans le contexte des changements globaux devra être estimée.

L'**érosion éolienne des sols** est, quant à elle, responsable de la majeure partie des particules injectées dans l'atmosphère, soit 1,5 milliards de tonnes par an, quantité très largement supérieure à l'ensemble des émissions anthropiques de particules (< 300 millions de tonnes par an). Cette érosion éolienne a, dans les régions-sources, des conséquences significatives sur la qualité de la couche superficielle des sols. Par ailleurs, ces aérosols ont des impacts très importants sur le climat, le fonctionnement de certains cycles biogéochimiques et, en zones de retombée, sur l'équilibre de certains écosystèmes terrestres (les systèmes forestiers comme en Amazonie ou les zones de montagne) ou océanique (zones « High Nutrients Low Productivity » comme l'océan Austral). Il est aujourd'hui admis que les émissions de poussières depuis les zones arides et semi-arides devraient significativement évoluer dans le futur puisqu'elles dépendent directement de la vitesse du vent, des précipitations et de la couverture de la surface, autant de paramètres dépendant du climat. Dans ce cadre, **les surfaces agricoles et les zones pastorales** représentent des sources importantes de particules minérales et (bio)organiques pour l'atmosphère, notamment lorsque le sol est sec, c'est-à-dire dans les zones semi-arides ou, en été, aux latitudes tempérées. Des travaux récents suggèrent que les modifications des pratiques agricoles dans les pays émergents (mécanisation, introduction d'outils de labour mal adaptés, mise en culture intensive) pourraient dans l'avenir affecter très notablement le contenu de l'atmosphère en aérosol (jusqu'à représenter 50 % des émissions totales de poussières). **Les surfaces continentales sont aussi une source anthropique indirecte de polluants atmosphériques** (fongicides, herbicides, insecticides, fertilisants...), encore mal évaluée. Pendant l'épandage, en fonction des conditions météorologiques et des modes d'applications, de 25 % à 75 % des produits phytosanitaires ne se déposent pas sur les aires traitées. Ce taux peut même atteindre jusqu'à 90 % sur des sols humides. Les pesticides peuvent donc s'introduire dans l'air lors de l'application (principalement au printemps), mais aussi *via* leur remobilisation par

volatilisation ou sous l'effet du vent après épandage. S'ils sont inhalés en grande quantité, ces composés sont de nature à affecter la santé humaine et animale. Il n'existe aujourd'hui aucune réglementation concernant la teneur de ces polluants dans l'air bien que la plupart des associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) aient décidé de les mesurer.

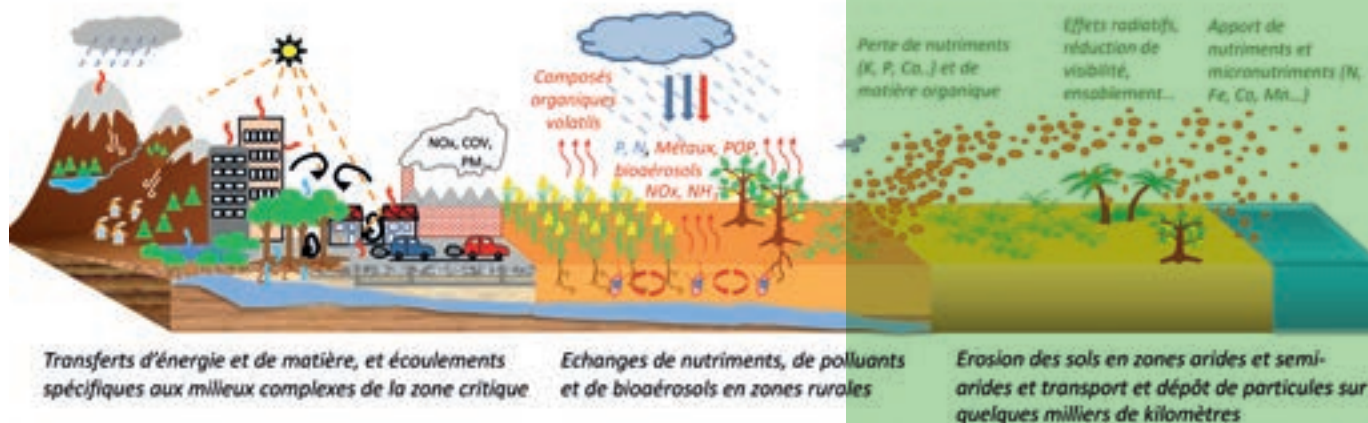
Un intérêt particulier doit également être porté aux interfaces que constituent certains milieux très spécifiques. L'étude du **milieu urbain** du point de vue de ses interactions avec l'atmosphère est cruciale au regard des enjeux sociétaux et environnementaux liés à l'urbanisation croissante. Le milieu urbain conduit au phénomène désormais bien connu d'îlot de chaleur, dont l'origine est liée à différents facteurs physiques (présence de matériaux artificiels, morphologie 3D, forte densité de surfaces imperméables, sous-sol remanié) qui modifient la répartition spatiale et temporelle des flux d'énergie dont la restitution vers l'atmosphère joue directement sur l'humidité et la température de l'air, et de là sur d'autres variables du système climatique. À ces modifications liées à la nature des surfaces s'ajoutent les émissions anthropiques directes de chaleur et d'humidité vers l'atmosphère, et de polluants que l'on retrouve dans l'atmosphère mais aussi sur les surfaces, dans les eaux et les sols urbains. Les mécanismes de transfert à l'origine des flux de chaleur et de polluants urbains, au sein et entre les différents compartiments de la zone critique (atmosphère-surface-sous-sol) sont très complexes du fait de l'hétérogénéité de ce milieu où coexistent des éléments construits et des éléments naturels (eau ou végétation). En particulier, la végétation urbaine, au cœur des stratégies d'adaptation de la ville, est directement impactée par les facteurs environnants tels que le microclimat local, la composition des sols, la ressource en eau ou la pollution atmosphérique de proximité; son fonctionnement est à ce jour encore mal appréhendé, et la quantification de son rôle sur les microclimats urbains et la qualité de l'air doit être poursuivie. Comprendre le rôle respectif des éléments qui constituent le milieu urbain sur les échanges d'énergie et de polluants, et leur impact sur l'environnement nécessite ainsi d'aborder le problème sous un aspect multi-échelles et multi-processus intégrant les différents compartiments de la zone critique.

Ces questions et enjeux sont très similaires à ceux que soulèvent les **milieux de montagne**, où l'on retrouve des découplages entre la couche limite atmosphérique et la configuration 3D des vallées, ainsi que des dynamiques locales spécifiques conduisant à des problématiques de santé, de ressource en eau, de risques et d'évolution de la biodiversité.

sité. Les enjeux en termes d'observation sont également majeurs dans cet environnement complexe où l'on observe d'ores et déjà les effets du réchauffement global. Face à ces changements, ces milieux sont ainsi susceptibles de subir des transferts de contaminations « dormantes » enregistrées par le passé suite à des pressions anthropiques (exploitations minières, charbonnage...), et pouvant impacter ainsi les êtres vivants. Comme dans les milieux urbains, les enjeux socio-économiques y sont aussi très prégnants. L'eau, tant sous forme liquide (lacs, fleuves, rivières...) que solide (glaciers, calottes...), représente une part importante de la surface des continents. En hiver, aux latitudes boréales, ce sont jusqu'à 25 % des terres émergées de l'hémisphère nord qui sont affectées par la présence de neige. Dans l'hémisphère sud, la neige est présente dans de nombreuses régions d'altitude. Avec une surface équivalente à celle de l'Europe, l'Antarctique est la plus grande surface glacée permanente de la Terre et le plus grand stock d'eau douce de la planète. La **cryosphère** constitue donc un type de surface continentale fondamentale sur notre planète avec une caractéristique majeure d'un point de vue climatique liée notamment à sa très forte réflectivité du rayonnement solaire incident. La quantification des flux d'énergie et de chaleur est essentielle tant en ce qui concerne le devenir des glaciers que le climat régional et global. Le dépôt, sur la neige ou la glace, d'aérosols à fort pouvoir absorbant est également de nature à affecter significativement le bilan énergétique des surfaces glacées. Parmi les points nécessitant une attention particulière, on mentionnera l'étude des couches limite stables telles qu'elles se développent au-dessus de la neige et la glace ou la mise en place de vents catabatiques dans les zones pentues. La force de ces vents et la turbulence qu'ils induisent influent sur les échanges d'énergie entre la glace et l'atmosphère. Le vent en surface est un paramètre crucial des échanges d'énergie et donc de la fonte des glaciers qui doit être mieux contraint.

## VERROUS TECHNIQUES

En termes méthodologiques, et contrairement à ce qui est observé sur d'autres questionnements SIC, la modélisation, à différentes échelles, des échanges entre les surfaces continentales et l'atmosphère est assez bien développée, avec des couplages plus ou moins forts entre les processus en jeu et des paramétrisations qu'il convient encore d'améliorer lorsque l'on s'intéresse à des milieux complexes. On dispose par exemple d'excellents outils de modélisation pour l'hydrométéorologie, l'érosion éolienne, la circulation atmosphérique et la dispersion des polluants en milieux urbains, les processus de dépôt... **Aussi, en termes de modélisation, ce sont plus souvent l'absence ou le manque de qualité des données d'entrée des modèles ou de validation à différents niveaux d'organisation qui posent le plus de difficultés.** C'est notamment le cas pour l'application à des niveaux régionaux ou continentaux de modèles développés pour l'échelle de la parcelle ou pour la prise en compte des interactions entre compartiments de la zone critique (sol-végétation-surfaces-atmosphère). La quantification des échanges aux interfaces nécessite souvent de réaliser **des mesures ou des estimations de flux**, ce qui reste compliqué même si la mesure de certains composés a pu bénéficier de développements métho-



dologiques comme le développement de techniques de mesures rapides rendant possible la mesure des flux par « eddy-covariance » (ou covariances turbulentes). Pour le dépôt, la mesure directe (notamment le dépôt sec et la neige) reste une difficulté expérimentale non résolue pour bon nombre d'espèces particulaires ou gazeuses. Le nombre très limité de réseaux de mesure dédiés constitue une forte limitation à une quantification spatialisée des échanges de nombreuses espèces et à leur utilisation pour la validation des modèles. **Clairement, des développements méthodologiques sont indispensables pour améliorer nos capacités à mieux quantifier l'intensité des échanges entre les surfaces continentales et l'atmosphère et donc à mesurer les flux des diverses espèces mentionnées ci-dessus (y compris les bioaérosols et les précipitations solides) et notamment lors de leurs interactions avec la végétation.** Si les flux d'eau et énergie sont facilement mesurables et interprétables à l'échelle d'une parcelle homogène, des problèmes se posent en milieu hétérogène ou montagneux. Des développements méthodologiques sont encore nécessaires pour la caractérisation expérimentale et la compréhension des échanges entre l'atmosphère et les éléments constituant ces milieux hétérogènes, notamment lorsque ces derniers sont de petite taille comme cela est souvent le cas en milieu urbain (toitures, jardins, etc.). Enfin, la quantification des échanges de polluants entre les différents compartiments air, eau et sols en milieu hétérogène constitue également un verrou qui ne pourra être levé qu'en combinant des observations régulières, des modélisations fines de dispersion atmosphérique et des modèles de transferts entre ces compartiments.

## IMPLICATIONS

Beaucoup des questionnements et verrous abordés ci-dessus sont des défis scientifiques qui ne peuvent se résoudre par des actions de recherche ponctuelles. Ce sont des priorités pour au moins les cinq prochaines années, qui devraient être mises en œuvre dans un contexte programmatique pluriannuel.

Le problème des questionnements aux interfaces est d'abord d'être aux interfaces : cela fait maintenant de nombreuses années que les prospectives SIC et OA du CNRS-INSU consacrent un chapitre spécifique à ces interfaces mais aucune action structurée, lisible et pluriannuelle n'a été réellement mise en place alors que dans le contexte « Earth System Model » les interfaces deviennent des points d'attention de plus en plus marqués. La conséquence est que beaucoup des questionnements mentionnés dans les prospectives précédentes n'ont pas été abordés. Il semble donc clair, au vu de cette expérience, que sans cadre programmatique bien défini, nous n'avancerons pas davantage cette fois que les fois précédentes. Un tel cadre est notamment

nécessaire pour pouvoir mettre en œuvre les campagnes d'envergure nécessaires à la mesure des flux à différentes échelles puis à leur modélisation intégrée. Une telle programmation est également nécessaire pour rassembler des communautés qui ont réfléchi à ces interfaces dans des cadres prospectifs différents.

En terme techniques, les principaux verrous sont de différents ordres :

- les techniques de **mesure de flux** dont nous disposons doivent être renforcées, notamment en ce qui concerne les mesures rapides de certains composés (gazeux et particulaires), ou à certaines échelles (petites surfaces), pour lesquelles nous sommes encore sous-équipés. Il y a également une nécessité à développer des capteurs permettant des mesures directes plus fiables et plus régulières des dépôts. Certains de ces équipements (notamment les capteurs rapides) pourraient être mutualisés et gérés par la DT du CNRS-INSU ; leur mise à disposition de tous avec les compétences nécessaires à leur mise en œuvre serait ainsi garantie ;
- en complément de ces mesures à haute fréquence, orientées vers la compréhension des processus, il est indispensable de maintenir le soutien aux systèmes d'observations nationaux qui renseignent notamment sur les plus basses fréquences et permettent de définir les tendances. Certains des systèmes d'observation du CNRS-INSU sont vraiment à l'interface avec OA (INDAAF, Glacioclim, OHM-CV, AMMA-CATCH...) et devraient être en gestion partagée. De même, les liens avec certains réseaux de surveillance réglementaire devraient être formalisés car ils constituent des sources d'information de grand intérêt. Enfin, certains milieux-clés ne bénéficient pas de tels observatoires (c'est le cas de la ville) et les efforts doivent être poursuivis pour faire émerger, sans doute en partenariat, de tels observatoires ;
- comme mentionné précédemment, les couplages de modèles constituent une priorité absolue si l'on veut appréhender l'ensemble des interactions entre espèces, milieux et échelles. C'est un problème complexe qui nécessite sans doute d'être d'abord abordé sur un domaine bien défini, comme composante à part entière d'une campagne d'envergure ;
- l'évaluation des impacts de ces échanges entre atmosphère et surfaces continentales restent encore insatisfaisante, principalement parce qu'elle nécessite d'agréger dans des projets intégrés des compétences appartenant à d'autres communautés (par exemple en termes de santé publique ou d'aménagement). C'est une autre forme d'interface qui pose problème de longue date. Si l'on veut vraiment aller jusqu'à l'évaluation des impacts (et pas seulement quantifier l'agent impactant), il faudra nécessairement trouver le moyen d'avancer ce qui nécessitera sans doute la mise en place d'un projet ambitieux, mobilisateur, partagé et multipartenaires (qui pourrait être couplé à la campagne mentionnée au point précédent).

## OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE ET RELATIONS AVEC LES PORTEURS D'ENJEUX

Comme mentionné précédemment, les principales questions adressées par l'interface surface-atmosphère sont liées aux flux de matière et d'énergie échangés.

Concernant l'énergie, l'évolution de l'usage des terres a des effets notables et non-homogènes spatialement sur l'albédo et les flux d'évapotranspiration, donc sur le climat mais également sur la météorologie, notamment urbaine. De nombreuses questions découlent de cela tant en matière d'aménagement que de gestion des ressources. Par exemple, la connaissance de l'évapotranspiration trouve des applications immédiates pour l'irrigation et la gestion de la ressource en eau et permet, avec l'appui de modèles de fonctionnement de la végétation, d'estimer la biomasse et la production des cultures, informations cruciales pour définir les politiques de sécurité alimentaire. L'adaptation des pratiques agricoles en réponse au changement climatique comme le suivi des cycles biogéochimiques et le maintien de la qualité des eaux et des sols (pollution par les nitrates, érosion éolienne de la couche superficielle des sols par exemple) sont également des enjeux importants. En milieu urbain, la végétation fait partie intégrante des stratégies actuelles d'adaptation de la ville aux divers chan-

gements : climat, modes de vie, croissance de la population et gestion des espaces, demande énergétique, gestion des eaux pluviales, qualité de l'air... Il existe donc un fort enjeu à en évaluer d'une part les bénéfices en termes de régulation thermique ou de dispositif alternatif à la gestion des eaux de pluie, d'autre part les effets potentiellement néfastes induits par l'émission des pollens allergisants ou de certains COV biogéniques précurseurs d'ozone, ou encore la consommation de la ressource en eau.

Concernant les échanges de matière, l'atmosphère est, comme mentionné précédemment un milieu très fluide qui permet des transferts rapides et lointains de polluants mais aussi de nutriments. Les surfaces, quant à elles, sont un puits essentiel pour cette matière. Enfin, sous l'effet du vent ou des précipitations, l'atmosphère est capable de déplacer la couche superficielle des sols. Ces derniers peuvent aussi réémettre des pathogènes et des pesticides ou autres produits d'épandage. Autour de chacun de ces éléments, des questions de santé publique, de gestion durable des ressources en sol ou encore de qualité de l'air nous sont posées par les décideurs. De même, évaluer le devenir des particules biologiques et des polluants anthropiques émis au sein du tissu urbain trouve tout son intérêt dans le cadre de la protection du patrimoine bâti, de la préservation de la biodiversité et de la santé des populations.

## RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Compte tenu des enjeux scientifiques et sociétaux que représentent les milieux d'interface, il est nécessaire de faire apparaître plus clairement leur importance au sein des programmes en créant une action commune pluriannuelle OA/SIC avec un comité scientifique dédié, favorisant les échanges directs entre communautés. Il est également nécessaire de s'impliquer davantage dans le développement d'instruments nouveaux ou dans l'adaptation de systèmes existants, notamment pour la mesure des flux (d'énergie, de dépôt et d'émission), et de réfléchir à des stratégies optimisées d'observation dans les milieux complexes. Un des éléments-clés de cette stratégie sera bien évidemment le soutien apporté aux SNO orientés vers les interactions surface-atmosphère. Enfin, il serait sans doute bénéfique de réfléchir à la possibilité d'organiser une campagne d'envergure, fédérative, emboîtant les échelles du local au régional et les milieux (de l'urbain au rural), permettant à la fois d'étudier les processus d'échanges et de tester les couplages de modèles.





© Laurent Froideval (M2C)



# LE CONTINUUM HOMME-TERRE-MER

## RÉSUMÉ GLOBAL

**Le continuum Homme-Terre-Mer (HTM) se conçoit dans le maillage des territoires et leurs aménagements. Ils doivent être étudiés dans leurs interactions, d'amont en aval –des têtes de bassins aux zones côtières et plateaux continentaux– mais aussi d'aval en amont pour prendre en compte les échanges de la mer vers les surfaces continentales. Les bassins versant, les corridors fluviaux et les littoraux ont toujours été, au cours de l'Histoire, investis par les sociétés humaines de sorte que la dimension anthropique doit être considérée tant des points de vues des transformations géomorphologiques et des pollutions engendrées par les activités humaines, que dans la perspective du changement climatique. L'étude du continuum HTM s'appuie sur une vision intégrative, interdisciplinaire et diachronique des milieux, des processus, des données, des modèles, des concepts. C'est dans cette intégration que cet atelier prospectif HTM prend tout son sens.**

## CONTEXTE SCIENTIFIQUE, TECHNIQUE ET SOCIÉTAL, LES ENJEUX

Le long des continuums aquatiques s'interconnectent de nombreux milieux (ruisseaux, zones humides et corridors rivulaires, étangs et réservoirs, rivières, estuaires, eaux souterraines, lagunes, zones littorales qui constituent autant d'interfaces entre eux mais aussi avec les territoires investis par l'Homme, que ce soit en zones urbaines ou rurales. Les bassins versants sont en effet des bassins de vie, investis par une activité humaine qui a largement modifié la morphologie et la qualité de ces continuums, depuis les temps historiques. L'aménagement des territoires par l'Homme s'est fait aux abords des rivières et des littoraux, l'eau étant une ressource essentielle à sa survie, mais aussi capable d'évacuer ses déchets et de faciliter le transport des matériaux pondéreux. Les étangs, barrages-réservoirs, la canalisation, les aménagements portuaires, etc. sont des exemples évidents de la transformation des cours d'eau. En zone côtière, l'aménagement du territoire, l'urbanisation littorale, ainsi que les actions menées par l'homme pour lutter contre l'évolution du littoral renforçant parfois l'intensité et l'impact des phénomènes d'érosion et de submersion, ont eu un impact majeur sur la zone littorale, en particulier sur

l'évolution du trait de côte (cf. par ex. Quevauviller *et al.*, 2017).

Le continuum Homme-Terre-Mer ne se limite pas au continuum aquatique, mais se conçoit aussi dans le maillage des territoires et leurs aménagements. Les changements d'occupations des surfaces, les systèmes et pratiques agricoles ont, en effet, largement modifié les paysages avec des effets cascades -pas toujours maîtrisés- au sein des continuums terrestres et aquatiques, jusqu'au littoral. Ces modifications ont même des impacts au-delà du littoral jusqu'au côtier (par ex. les canyons en bordure de plateau continental qu'une partie des sédiments rejoint, y constituant des vasières qui sont mal connues dans leur fonctionnement géophysique et biogéochimique).

Ainsi les défis scientifiques du XXI<sup>e</sup> siècle concernent, au sein du continuum Homme-Terre-Mer (HTM) et en réponse aux changements globaux et impacts anthropiques, la caractérisation, la prévision et la remédiation :

- des quantités d'eaux continentales (souterraines et de surface) et de leurs dynamiques spatio-temporelles dans un contexte de changement global, modifiant ainsi les apports d'eau douce à la mer et les flux d'évapotranspiration ;
- de la quantité, qualité, origine et devenir des flux biogéochimiques et de leurs transformations le long du conti-

num, en termes (I) de macropolluants et micropolluants inorganiques (azote, phosphore, éléments trace métalliques –ETM- par exemple), (II) de contaminants émergents (micro-polluants organiques, antibiotiques, pesticides, nano-particules, micro-plastiques, pathogènes...), (III) de caractérisation des flux particulaires et de matière organique associée (MO), en particulier pour leur capacité à être considérés comme un vecteur (phase porteuse) des contaminants, qu'ils soient organiques ou métalliques ;

- de l'évolution des aléas d'érosion littorale, de submersion marine, de crue et d'inondation, de salinisation d'estuaires et de subsidence de deltas, qui sont des phénomènes souvent localisés mais profondément dépendants du continuum Homme-Terre-Mer ;
- de résistance, de résilience et d'adaptation des communautés biologiques aux variations de ces flux, mais aussi à celles des températures, aux événements extrêmes qui engendrent des situations de crises (par ex. hypoxie, acidification des milieux aquatiques continentaux, estuariens et marin) ;
- des échanges sédimentaires entre les fleuves, les franges littorales et le plateau interne le long du gradient anthropique, en quantifiant l'importance du biseau salé qui remonte vers le continent, et les conséquences de la régulation hydrologique sur les dépôts estuariens ;
- du décryptage des archives sédimentaires, qu'elles soient fluviales, estuariennes ou marines et des archives historiques (Garnier *et al.*, 2017) qui renseignent sur la réponse et l'adaptation des territoires (bassins versants), et leurs trajectoires associées face au changement global, et ce, à une échelle décennale, séculaire, voire millénaire.
- de l'état des sols soumis à des changements d'occupation, de pratiques et engendrant, d'amont en aval, des fuites par lixiviation et érosion vers l'hydrosystème (les eaux sous-racinaires et les particules érodées à l'échelle de la parcelle ont en effet une influence jusqu'aux zones marines côtières, cf. contamination nitrique, pesticides, ETM, micro-plastique...). Certaines de ces fuites sont entre autres à l'origine de gaz à effet de serre –GES– le long du continuum ;
- de l'état de la biodiversité des systèmes terrestres et aquatiques (lentiques, lotiques ou marins) et les connectivités/invasions/adaptations le long du continuum.

L'activité humaine est à l'origine **d'héritages** d'éléments dans les sols (par ex., phosphore agricole, microcontaminants industriels...) ou dans les aquifères (nitrate, pesticides...), qu'il est important d'étudier avec **une vision diachronique**, pour comprendre **les trajectoires socio-écologiques** passées et mieux dessiner celles d'un futur, souhaitable pour la planète et souhaité par les sociétés humaines. Les polluants qu'ils soient macro- ou micro, inorganiques ou organiques doivent, au-delà de l'inventaire et du niveau de contamination, être mieux appréhendés selon **leurs ori-**

**gines ou leurs devenir**s en croisant les approches et/ou les disciplines.

Les structures et dynamiques des organismes constituent des indicateurs intégratifs de l'environnement et des perturbations et la sixième extinction en cours, massive est typiquement reliée à l'activité humaine. La conservation de la biodiversité, sa restauration... nécessite encore de mobiliser des disciplines variées.

La communauté scientifique doit au total s'attacher à quantifier les flux d'eau (surface et souterraines), de matière et d'énergie **d'amont en aval** des continents vers les océans en prenant en compte les changements climatiques et leurs extrêmes, **d'aval en amont** avec la prise en compte du biseau salé qui remonte vers le continent, et de manière transversale en intégrant les bassins versant et les corridors fluviaux ainsi que les usages de l'eau et du sol (Figure 1).

La réalisation d'une Expertise Scientifique Collective (ESCO) sur l'eutrophisation en 2017 (Pinay *et al.*, 2017) a insisté par exemple sur les différences des cycles de l'azote et du phosphore qui peuvent expliquer pourquoi les stratégies d'abatement des nutriments réalisées ces dernières décennies ont eu des résultats différents entre eaux fluviales et eaux côtières. La remédiation de l'eutrophisation doit donc aller vers des approches systémiques intégrant les hydrosystèmes, les espaces urbains et agricoles, les modes de production, d'alimentation et de recyclage. La question des transitions agricoles et de leur intégration dans les modèles est de manière générale étroitement liée à celle de l'eutrophisation (Desmit *et al.*, 2018 ; Garnier *et al.*, 2018).

Les défis méthodologiques et techniques majeurs pour alimenter ces problématiques scientifiques sont :

- L'interdisciplinarité intégrant toutes les combinaisons disciplinaires possibles et utiles pour caractériser notre histoire environnementale, y compris les sciences humaines et sociales. Cette interdisciplinarité doit aussi s'appuyer sur des travaux disciplinaires afin d'être en capacité de répondre ensemble, aux défis soulevés.
- Le développement d'outils de modélisation permettant de faire dialoguer les modèles aux interfaces dont les effets « filtre » sont reconnus (par exemple aux interfaces nappe-rivière, en zone estuarienne...). Les interfaces à l'échelle micrométrique, telles que minéral-organisme, sont aussi des acteurs centraux des transferts des éléments majeurs et traces ; les piègeages et transformations à leur surface ou dans leur structure constituent, entre autres, un mécanisme majeur de séquestration/source des polluants. Ces outils de modélisation doivent aussi permettre de couvrir une large gamme d'échelles spatio-temporelles pour la réalisation de changements d'échelle.
- L'extension de l'expérimentation et de l'observation (capteurs biochimiques, LiDAR bathymétrique, etc.) notam-

ment à haute fréquence, en intégrant et développant les nouveaux outils d'analyses (par exemple chimie moléculaire et isotopique) pouvant aussi être de haute à très haute résolution spatiale (par ex., spectroscopie : caméra hyperspectrale).

Ces problématiques scientifiques et outils associés doivent pouvoir répondre aux enjeux sociétaux de ce siècle :

- Comment limiter l'impact du changement climatique et de la pression anthropique sur les milieux ?
- Comment nourrir l'humanité (grâce à la fertilité des sols et l'eau) tout en lui offrant un environnement durable, viable et agréable ?
- Comment mieux comprendre et prévoir les événements extrêmes et leurs impacts sur les sociétés humaines et s'adapter aux changements globaux à l'échelle des territoires investis par l'activité humaine ?
- Comment préserver les écosystèmes et les services qu'ils nous rendent, des stress multiples engendrés par les effets conjoints de l'activité humaine et du changement climatique ?

## ÉTAT DE L'ART ET VEROUS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Depuis la prospective 2013, des avancées ont eu lieu sur le plan de la biogéochimie continentale et littorale, qu'il s'agisse de la stœchiométrie des nutriments et du développement algal conduisant à l'eutrophisation des côtes, avec parfois des effets délétères pour l'environnement (hypoxie, toxicité...), des flux de contaminants émergents tels que les micro-plastiques, micropolluants organiques, nanoparticules, pathogènes... La caractérisation moléculaire de la matière organique a également fait l'objet de développements analytiques permettant d'identifier des signatures géochimiques et de déterminer certaines de ses sources (comme l'érosion et l'altération des roches sédimentaires sub-affleurantes).

**La modélisation** permet aussi d'afficher des développements majeurs tant en zone côtière et océanique qu'en milieu continental (cf. Atelier 11 modélisation). Du point de vue du continuum Terre-Mer, une chaîne de modélisation a été mise à l'épreuve à l'échelle régionale, couplant le modèle Riverstrahler de réseaux hydrographiques (FIRE-CNRS) prenant en compte un modèle Grafts du système agroalimentaire (FIRE-CNRS), avec le modèle EcoMars-3D

(IFREMER). Cet outil, alimenté par des contraintes anthropiques finement renseignées, et par une hydrologie sous changement climatique peut d'ores-et-déjà être qualifié de modèle Homme-Terre-Mer. À l'échelle globale, le modèle de surface ORCHIDEE (IPSL-CNRS) utilisé dans des modèles climatiques est en développement pour y intégrer les composantes aquatiques du continuum Terre-Mer et être couplé à des modèles océaniques, NEMO par exemple (IPSL-CNRS). L'évolution de la première approche vers des échelles pluri-régionales, et de la seconde vers la régionalisation devrait enrichir différents codes de calculs. L'outil SWAT d'évaluation d'un bassin versant fluvial « Soil and Water Assessment Tool » (Département de l'Agriculture des États-Unis, USDA), disponible en accès libre sur internet, est par ailleurs de plus en plus utilisé à l'échelle nationale, mais pas encore couplé au domaine marin.

Toutefois parmi les développements effectués d'autres formalisations pourraient être prises en compte, par exemple en milieu continental la modélisation du filtrage de la variabilité du signal climatique par les territoires induisant celle des flux hydriques et particulaires, la modélisation aux interfaces nappes-rivières, la modélisation agronomique des systèmes sol-eau-plante-microorganismes, ainsi que celle du transfert de polluants agricoles par voie atmosphérique (azote par ex.).

Au niveau du littoral, des avancées majeures ont été réalisées dans la modélisation 3D des courants induits par les vagues qui permettent le découplage des communautés côtière et littorale (par ex. CROCO, SYMPHONIE et MARS). Le développement d'approches couplées océan-atmosphère pour la modélisation du domaine côtier a également permis une meilleure reproduction et compréhension des événements de surcote pendant les événements extrêmes (Bertin *et al.*, 2015). La modélisation hydro-dynamique sur des grilles non-régulières (modélisation non-structurée ou structurée, 2D ou 3D) permet de résoudre le continuum d'échelles de l'océan côtier au littoral et jusque dans les estuaires. Un développement en rupture avec les avancées ci-dessus a concerné les modèles à complexité réduite pour simuler l'évolution du trait de côte. Contrairement aux modèles classiques très non-linéaires basés sur une description fine des processus physiques dont les erreurs cascaded rapidement vers les grandes échelles, ce type d'approche permet de simuler des évolutions à long terme (plusieurs dizaines d'années), tout en calculant les évolutions à l'échelle de la tempête (Splinter *et al.*, 2014). Leur implémentation simple est compatible avec le couplage

de flux sédimentaires provenant d'autres compartiments du continuum (apports fluviaux, apports plateau interne). Ainsi, l'amélioration des modèles et leur inflexion vers des échelles temporelles plus grandes a permis une meilleure prise en compte des bases de données d'observation qui concernent des périodes de plus en plus longues (Vitousek *et al.*, 2017).

Il apparaît donc une meilleure appropriation par la communauté scientifique **des données produites** tant par les services d'observation (Services Nationaux d'Observation, SNO CNRS-INSU par exemple) que par les institutions de surveillance des eaux continentales (Agences de l'Eau en France, ou équivalents en Europe).

Si certaines de ces données acquises peuvent servir à contraindre les modèles, d'autres servent à la validation. Les longues séries de données sont, à ce titre, indispensables, en particulier pour retracer les trajectoires du passé, et permettent d'étudier les réponses des territoires (en temps et amplitude), informations utiles pour les prises de décisions politiques et les actions à mettre en œuvre. La création récente des Infrastructures de Recherche (IR ILICO pour le côtier et OZCAR pour les bassins versants) permettant une meilleure synergie des différents réseaux d'observations, a pour objectif un décloisonnement thématique des réseaux d'observations afin d'aborder de façon globale les problématiques liées aux dynamiques des environnements du continuum HTM.

On notera l'apport de nouvelles données de télédétection spatiale (satellites actuels: Sentinel 1-2-3-6 / Landsat/Pléiades / VEN $\mu$ S / SMOS / GRACE2 / BIOMASS / JASON-3 et programmés: SWOT/ MicoCarb ou à l'étude: HYPIXM) pour progresser dans l'acquisition de données spatialisées à fréquence temporelle réduite sur les surfaces terrestres. Ces données sont déjà largement utilisées pour inventorier et quantifier l'eutrophisation ou la turbidité en zone côtière, la géométrie du trait de côte, les cotes d'eau et débits des fleuves, les variations de stocks d'eau des lacs et réservoirs, l'humidité du sol, les variations totales de l'eau stockée sur les continents, la géomorphologie fluviale et lacustre, l'occupation du sol, l'évolution du couvert végétal, la dynamique du manteau neigeux et des glaciers, la marée estuarienne et fluviale, etc. Il faut aussi noter, qu'il existe désormais un certain nombre de missions satellitaires (par exemple la « Global Precipitation Measurement Mission Constellation ») dont les mesures permettent de fournir des produits de précipitations à l'échelle globale (ou spécifiquement aux latitudes tropicales, comme la mission Megha-Tropiques) et sont donc essentielles pour l'étude des eaux continentales. Les méthodes d'assimilation de données (météorologiques, hydrogéologiques, etc.) permettent par ailleurs d'améliorer la prévision.

Tous ces outils existent mais l'effort doit désormais porter sur leur couplage technique, ce qui constitue un verrou scientifique majeur, sans une interdisciplinarité suffisante et des compétences dédiées à ces tâches. Il est à ce stade encore important de souligner que les simulations doivent considérer que la connectivité entre les compartiments du continuum aquatique ne se fait pas uniquement de l'amont vers l'aval, mais aussi de l'aval vers l'amont, le biseau salé en étant une excellente illustration, et enfin latéralement dans les corridors fluviaux. Il faudra aussi s'attacher aux différences d'échelles (spatiales et temporelles), tant au niveau des divers réseaux et moyens d'observations (*in situ*, par télédétection...) qu'à celui des modèles, afin de pouvoir les combiner et les utiliser de manière appropriée.

Des **innovations** importantes ont vu le jour récemment, notamment (I) dans le développement et l'opérationnalisation de plateformes (Drones/ gliders) / capteurs / méthodologie (photogrammétrie / cartographie Lidar / mesures à haute résolution), (II) en capacité de calcul, et (III) en production de données associées. Ces avancées techniques non seulement contribuent à accroître la connaissance des surfaces et interfaces continentales, mais devraient aussi aider à débloquent des verrous de la modélisation.

Si les efforts doivent être maintenus sur les développements instrumentaux, **l'expérimentation** reste une des priorités dans de nombreux domaines. Par exemple, alors que l'on sait que la température va augmenter de plusieurs degrés à l'horizon 2100, l'adaptation des communautés des bactéries, archées, virus, champignons, des végétaux et animaux microscopiques ou macroscopiques est peu connue, pas plus que le remplacement structurel ou fonctionnel de ces communautés. Les événements pluviaux extrêmes accentueront l'érosion et donc la charge particulaire (qui représente alors au moins 70-90 % du flux particulaire, mais qui reste difficile à quantifier pendant ces événements hydroclimatiques extrêmes). Ces apports, requièrent aussi d'être qualitativement déterminés (cf. techniques multi-sources), et leurs impacts sur les transferts d'éléments et les écosystèmes dans le milieu marin quantifiés dans les deltas et les zones marines dominées par les apports des fleuves.

Enfin, le concept du continuum Homme-Terre-Mer dont le développement repose sur d'autres concepts tels que le « river continuum concept » (Vanote *et al.*, 1980), la « critical zone » (Ashley, 1998), l'écologie territoriale (Barles, 2010, 2017), l'anthropocène (popularisé par Crutzen & Stoermer, 2000)... devra aussi être à l'origine de nouveaux rayonnements conceptuels plus spécifiques.

L'étude du continuum Homme-Terre-Mer se heurte donc à des verrous d'ordre général:

- Le continuum n'est pas unidirectionnel d'amont en aval ou d'aval en amont, mais peu d'approches sont bijectives

ou quand elles le sont (cf. modélisation estuarienne), elles commencent tout juste à être incluses entre la terre et la mer, à des échelles locales. Les corridors fluviaux, espaces de divagation des cours d'eau sont également une dimension importante du continuum Homme-Terre-Mer.

- Il existe une série de modèles (pas tous finalisés) pouvant représenter les continuums Homme-Terre-Mer, mais les interactions y sont peu intégrées (cf. ci-dessus). Il n'existe donc pas de modèle intégré du continuum Homme-Terre-Mer, qui de plus nécessiterait un lien avec la modélisation socio-éco-systémique (économique et écologique), prenant en compte l'espace (3D), le changement d'échelle et le temps (modèle de continuum 5D).

## PRIORITÉS POUR LES ANNÉES À VENIR

L'objectif des recherches futures est de progresser dans la compréhension des systèmes et des milieux dans toutes leurs dimensions et leurs interactions afin de pouvoir concevoir et proposer des **actions**, notamment correctives (**préventives plus que curatives**).

Ces actions ne peuvent se concevoir sans une analyse de la **résistance** et **résilience** des écosystèmes au sein du continuum afin d'appréhender leur possible **adaptation**. Cette connaissance doit s'intégrer dans une modélisation numérique qui en reproduisant les conditions du présent et du passé permet d'explorer des scénarios du futur.

Détecter précocement les facteurs d'évolutions et de risques, agir sur les pressions, atténuer les impacts des changements globaux, restaurer les milieux, évaluer l'efficacité de ces actions, développer des infrastructures basées sur des « nature-based solutions », trouver de nouvelles trajectoires permettant une plus grande résilience et durabilité des milieux, sont autant d'objectifs pour des travaux de recherche innovants.

### Au cœur du continuum Homme-Terre-Mer : des interfaces singulières

**Les estuaires** sont des zones très actives tant du point de vue hydro-sédimentaire que de la biogéochimie, ce qui leur confère un rôle de filtre ultime des nutriments et des sédiments apportés par les rivières avant leur arrivée en zone marine côtière (Figure). S'ajoutent à la problématique des nutriments celle du carbone en termes de charges autochtone (production primaire) et allochtone (venant du bassin versant), consommatrices d'oxygène, ce qui a des implications fondamentales sur les cycles biogéochimiques (y compris gaz à effet de serre) et sur la vie aquatique dans l'estuaire et la zone côtière. La matière organique particulière associée au bouchon vaseux a en outre un rôle fondamental dans le stockage ou déstockage des polluants. Notons enfin que le changement de régulation hydrologique et la réten-

tion particulière dans les barrages modifient très significativement la dynamique du bouchon vaseux et les taux de dépôt, entre l'estuaire et le prodelta. Les changements manifestes dans certains grands bassins tropicaux (comme au Vietnam, le Mékong, le Fleuve Rouge, la rivière Saïgon, ou en Chine, au Laos...), dont l'équipement en barrages n'est pas terminé, fragilisent de plus en plus les deltas, par ailleurs très sensibles aux assauts maritimes (montée du niveau de la mer, surcotes de tempête, moussons, vagues).

L'estuaire est donc un compartiment emblématique du continuum Homme-Terre Mer, car il concentre la pollution générée sur son propre bassin versant souvent très fortement anthropisé (activités portuaires, densité de population, tourisme, agriculture...). L'estuaire et la zone côtière adjacente subissent donc depuis longtemps une pression d'aménagement forte (urbanisation, endiguement) et des flux de pollution élevés, et il est établi que les littoraux adjacents aux embouchures et estuaires sont les plus dynamiques à l'état naturel en termes de mobilité du trait de côte (Castelle *et al.*, 2018a). L'urbanisation côtière est un phénomène grandissant tant sur nos côtes que dans le monde et l'utilisation accrue des ressources qui en résulte constitue de nouveaux risques, qui exposent en retour ces populations.

Il existe des modèles estuariens, surtout hydro-sédimentaires, développés à l'échelle nationale ou à l'étranger. Peu sont couplés à la biogéochimie et donc capables de mettre en évidence cet effet filtre vis-à-vis des polluants. Le modèle de Volta *et al.* (2016) pourrait être un bon candidat pour les estuaires tidaux. Dans un premier temps, cet outil implémenté à des échelles pluri-régionales pourrait s'intercaler dans une chaîne de modélisation bassin versant-zone côtière. Une telle approche nécessiterait de renforcer les interactions entre les communautés scientifiques des systèmes continentaux (eau et sols), des estuaires et des zones côtières et permettrait de concevoir un nouveau cadre de modélisation.

Si l'hydrodynamique des estuaires tidaux semble bien connue au premier ordre, la variabilité de la stratification et de la circulation 3D reste encore généralement mal décrite et quantifiée; or elle est a priori déterminante sur les transports d'eaux, de matière et d'éléments biogéochimiques entre estuaire et océan côtier. Des collaborations plus étroites entre les expérimentateurs et modélisateurs des différents compartiments doivent donc être fortement encouragées. Par ailleurs, les processus propres à l'estuaire doivent être étudiés: production en zone turbide, évolution de la matière organique en mélange complexe (minéralisation, agrégation, floculation, co-métabolisme); rôle du compartiment benthique comme relai, interaction pélagique-benthique, rôle des événements extrêmes sur les flux et l'évolution des écosystèmes, nutriments et carbone hérités...

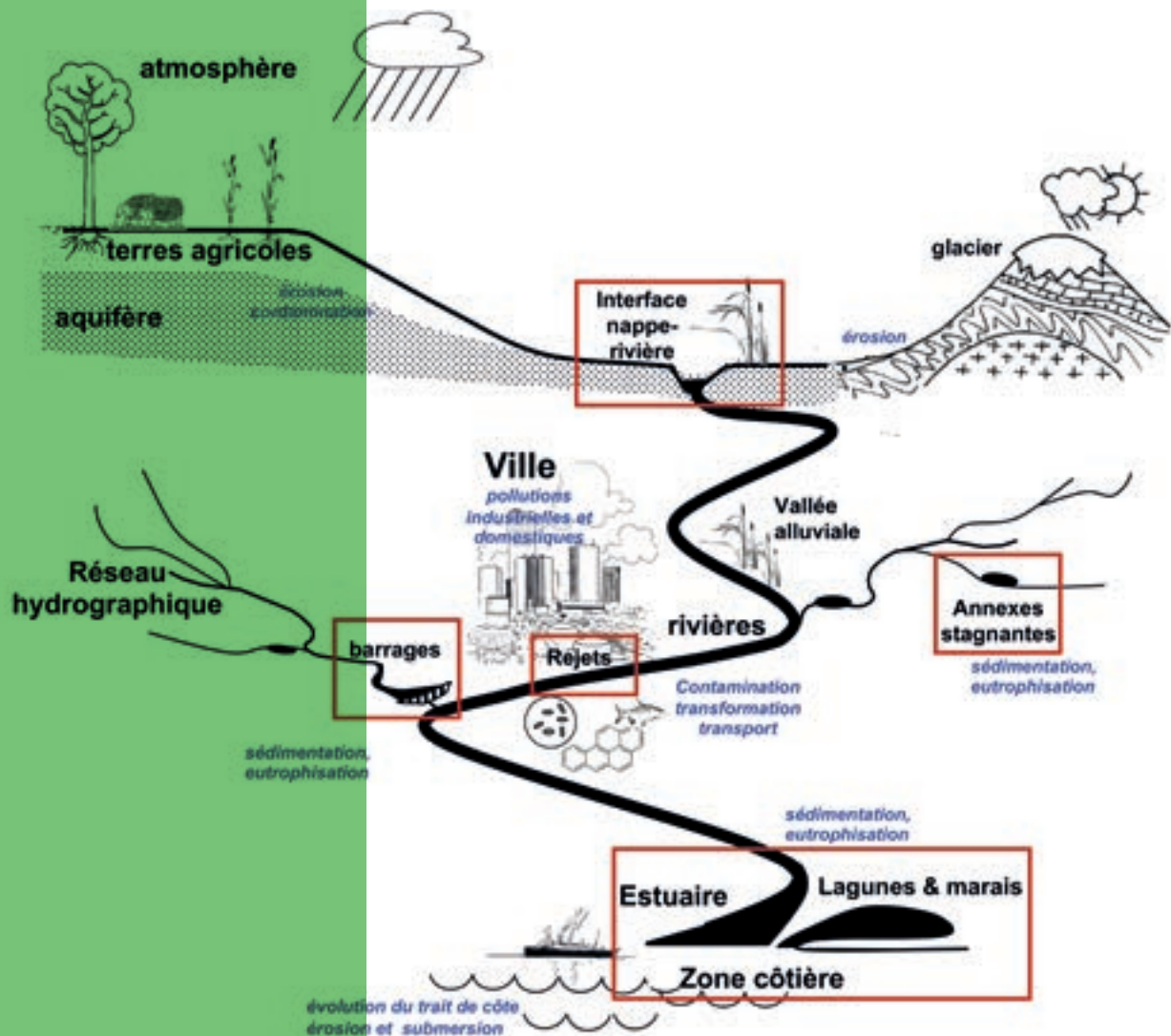


Les **zones humides littorales**, associées ou non à des estuaires, portent, pour beaucoup d'entre-elles, l'héritage depuis plusieurs siècles des conquêtes sur la mer par l'Homme (Figure). La démarche de la dépoldérisation, engagée depuis quelques dizaines d'années dans les pays d'Europe occidentale, ne peut être abordée pleinement que sous l'angle du continuum HTM car elle doit intégrer la maîtrise des échanges d'eaux continentales et marines à la prise en compte des choix opérés par la société (urbanisa-

tion, usage, etc.). De façon plus générale, la complexité du fonctionnement hydraulique des marais, ce dernier parfois géré par l'Homme, en fait des systèmes où les cycles biogéochimiques sont peu décrits, ce qui est le cas de nombreuses masses d'eau dites « fortement modifiées » (au sens de la Directive Cadre sur l'Eau). Ces dernières années ont vu se développer des approches de modélisation « éco-géomorphologique », principalement aux États-Unis et aux Pays-Bas (van Maanen et al., 2015), qui peuvent apporter des réponses sur les évolutions physiques du système « estuaire-marais », en intégrant l'interaction avec la végétation, qui est fondamentale dans le processus d'évolution des zones littorales.

Les **lagunes méditerranéennes** sont des exutoires de continuum HTM particulièrement fragiles en raison du temps de résidence élevé de leurs eaux (Figure). Certaines d'entre-elles ont des caractéristiques très différentes de celles des

Schéma conceptuel du continuum Homme-Terre-Mer. Les processus dominants dans un secteur du continuum sont indiqués en bleu. Les zones de discontinuités et/ou de bijection sont encadrées en rouge



estuaires comme la lagune de Salse-Leucate entourée de terrains karstiques et de zone humides et de cordons dunaires. Les eaux douces y sont principalement apportées par des résurgences, ce qui rend difficile la description de leurs modalités de circulations de l'amont vers l'aval. Les besoins en connaissances sur ces continuums laguno-karstiques sont d'autant plus urgents que la pression démographique sur leur bassin versant et la menace de submersion sont amenées à s'amplifier.

Les **rejets d'origine urbaine**, qu'ils soient d'origine domestique, industrielle ou agricole, constituent une source majeure de polluants liés à ces activités dans le continuum HTM (Figure). Leurs études doivent intégrer non seulement du diagnostic à travers les flux et devenir des polluants en aval, mais aussi, en amont, tout le cycle de vie des produits manufacturés à l'origine de la pollution, afin de proposer des changements d'usages visant à réduire la pollution à la source (procédés safe-by-design).

Aux **interfaces nappe-rivière**, outre la complexité des circulations d'eau et les conditions d'oxydo-réduction qui y règnent, le risque de transfert des micropolluants depuis la rivière ou ses sédiments jusqu'aux captages dans la nappe alluviale est fortement dépendant de l'effet filtre assuré par la berge (Figure). Son rôle auto-épuratoire dans le cadre d'échange nappe-rivière doit être étudié pour les divers types de micropolluant présents dans le cycle d'usage de l'eau, tels que phytosanitaires, alkyls per- et polyfluorés, pharmaceutiques, composés azotés et phosphorés (par ex., Curie *et al.*, 2009; Gu *et al.*, 2017), afin d'appréhender la vulnérabilité des champs captant vis-à-vis des micropolluants notamment en cas de pics de concentration. La modélisation à ces interfaces où les échanges sont aussi bidirectionnels est, comme pour les estuaires, lagunes et marais, un enjeu scientifique majeur.

Les **barrages-réservoirs** destinés à retenir l'eau dans les hydrosystèmes pour des usages variés (irrigation, hydroélectricité, soutien d'étiage ou protection contre les crues...), modifient la géomorphologie du paysage, et ont en outre un impact important sur le régime hydrologique des cours d'eau situés à l'aval, ainsi que sur le fonctionnement biogéochimique du continuum aquatique jusqu'à la mer, le piégeage de la silice conduisant par ex. à un déséquilibre stoechiométrique à la zone côtière (Figure). Leur prise en compte dans l'analyse du continuum HTM et leur modélisation est également un défi scientifique, aux enjeux socio-géopolitiques.

Ces différents exemples de milieux clé du continuum HTM montrent à quel point l'interdisciplinarité est nécessaire pour évaluer l'ampleur des pressions exercées (pollutions,

accès aux ressources, érosion, modification du milieu, navigation...), leurs perceptions et identifier les signaux faibles, comme indicateurs des possibles futurs à explorer par la modélisation.

### **Des études de processus à analyser d'une manière générique dans le continuum**

Qu'il s'agisse de l'estuaire, du bassin versant ou de la zone côtière, mettre l'accent sur **les processus hydrologiques, sédimentaires, biogéochimiques, physico-chimiques et énergétiques** reste une nécessité, mais ces travaux doivent s'inscrire dans le cadre d'une formalisation conceptuelle ou mathématique qui puisse s'appliquer à tous les milieux (généricité) en considérant les processus biotiques et abiotiques. L'utilisation de traceurs dans le milieu naturel (par exemple isotopes du carbone  $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ ,) peut également contraindre efficacement les processus et les sources des éléments apportés au milieu. La toxicologie des contaminants dans les différents compartiments fait typiquement intervenir ces processus biotiques et abiotiques, et doit être appréhendée en évaluant conjointement les incidences sanitaires d'un **risque environnemental** sur une population donnée (**expologie**), afin d'estimer le risque global de ces contaminants, les **conséquences écotoxicologiques** de leur flux en termes de risques, tout au long du continuum. Leur persistance et devenir dans les milieux doivent être aussi étudiés et leur cycle de vie doit être appréhendé pour remonter à leur source et transformation. Les études des processus sont le plus souvent basées sur des expériences de terrain ou de laboratoire et doivent bénéficier d'approches sophistiquées, parfois coûteuses, mais qui peuvent en retour faire l'objet de déclaration d'inventions (cf. nouveaux modes de détection des polluants).

Outre la caractérisation, quantification et modélisation des flux de matière dans le continuum HTM, l'étude des flux d'énergie associés est également une priorité, pour faire le lien avec les bilans d'énergie et les variables physiques des milieux en particulier la température et les rayonnements (solaire et thermique). Les activités humaines et l'évolution du climat impactent en effet significativement la température de l'ensemble des milieux du continuum HTM, les flux biogéochimiques et donc la qualité des eaux, les flux sédimentaires et leur qualité, ainsi que la biodiversité aquatique.

### **Les changements d'échelles « espace-temps » : données, modèles, interdisciplinarité**

En défiant parfois le manque de données, **l'identification des sources**, la **quantification des flux et des stocks** de matières et polluants d'intérêts (sédiments, matières organiques, nutriments, contaminants...) à des échelles

temporelles (journalière à millénaire) et des échelles spatiales emboîtées, des territoires aux bassins-versants dans des conditions climatiques et anthropiques contrastées permettent de tester la cohérence des résultats avec une mise en regard des vitesses de processus. Outre l'espace 3D, l'emboîtement des échelles et la profondeur temporelle acheminent la communauté scientifique vers la **conceptualisation et modélisation 5D**. S'il existe de nombreux travaux sur les flux, les stocks et les sources sont plus difficiles à quantifier. Les études de métabolismes bien connues des collègues en sciences humaines et sociales, peuvent être adaptées sous l'angle de la biogéochimie territoriale à l'ensemble des éléments. En cherchant à effectuer ces études dans le passé, incluant donc les archives sédimentaires, il est possible d'identifier et quantifier les héritages de l'activité humaine dans les dynamiques biogéochimiques du continuum Homme-Terre-Mer. La profondeur temporelle de notre connaissance requiert des collaborations fortes entre toutes les sciences environnementales (histoire, géographie, urbanisme, écologues, géologues, biogéochimistes, biologistes, sédimentologues, physiciens et géophysiciens, etc.). Identifier le manque de données de la période actuelle, doit contribuer à améliorer les programmes d'échantillonnage.

Les évolutions observées au sein du continuum HTM sont complexes et une question scientifique majeure concerne **l'identification des contributions respectives sur ces évolutions** des processus naturels, du changement climatique et de l'impact de l'Homme. Il est évident que la modélisation numérique et l'assimilation de données auront un rôle central à jouer. Les réponses devront être apportées à l'échelle des territoires en prenant en compte les différents éléments du continuum, ce qui permettra une meilleure adaptation aux perturbations.

### **Les événements extrêmes : résilience et adaptations**

**Les événements extrêmes** (crues, tempêtes, cf. chapitre 10) jouent un rôle majeur, leur fréquence et leur intensité vont être affectés avec le changement climatique. Ces événements sont d'ailleurs dominants dans les bilans de matière des estuaires et deltas puisqu'on estime que 70-90 % des apports particuliers par les fleuves surviennent pendant des événements de crues. L'effet de ces événements disruptifs sont mal connus, mais influencent largement les bilans et le fonctionnement des écosystèmes à long terme. Comprendre comment l'effet de ces événements extrêmes cascade dans leur variabilité temporelle vers les grandes échelles jusqu'aux évolutions pluriannuelles peut permettre de mieux les caractériser et d'envisager l'évolution des transferts biogéochimiques et des écosystèmes afin de les anticiper. L'étude de ces événements doit mobiliser

tant les bases de données, des suivis à long terme que des approches expérimentales spécifiques, du point de vue des transferts physiques, de la biogéochimie. L'étude des perceptions de ces événements est également fondamentale.

Face à l'accélération de l'érosion, il apparaît indispensable d'étudier les archives sédimentaires retraçant les grandes étapes de l'évolution des paysages et écosystèmes littoraux depuis le dernier glaciaire. Les archives constituent en effet des témoins directs de l'évolution d'un environnement côtier en mutation et sont donc à même de fournir des scénarii d'évolution, par ex. du trait de côte en contexte de changement du niveau marin global.

Pour comprendre **la résilience des systèmes aux perturbations** (naturelle ou anthropique), le lien du gradient anthropique est essentiel, particulièrement dans un contexte de changement climatique. Par exemple au niveau de l'évolution physique des littoraux, la remise en évolution naturelle (par ex. dépoldérisation, mise en libre évolution de marais côtiers et de systèmes de protection comme les dunes) peut permettre à des secteurs côtiers de retrouver une évolution *via* une dynamique contrôlée améliorant la résilience du système littoral tout en favorisant une plus grande biodiversité et des services écosystémiques associés (par ex. nurseries pour les poissons, zones d'habitats pour les oiseaux migrateurs). Mieux comprendre la dynamique de ces espaces est capital. En effet, au regard des coûts de protection des côtes de plus en plus élevés et des capacités de financement de la puissance publique limitées, il y aura un choix inévitable entre le maintien des défenses côtières et leur renforcement, une adaptation plus souple, voire l'abandon en cas d'élévation importante du niveau marin ou de recrudescence des tempêtes (Castelle *et al.*, 2018b). Ces choix, réalisés à l'échelle de territoire devront être faits en croisant le risque physique et les enjeux socio-économiques. Là où les acteurs ont commencé à tester ces mesures (par ex. Conservatoire du Littoral, Office National des Forêts) qualifiées de « nature-based-solutions », il sera pertinent d'étudier scientifiquement l'adaptation de ces véritables laboratoires naturels aux perturbations à travers des approches interdisciplinaires, ainsi que de croiser ces études avec des analyses de la perception sociétale de ces changements.

## **IMPLICATIONS POUR LA RECHERCHE**

### **Les moyens en équipement et en analyses**

#### **Équipements et analyses de laboratoires ou in situ et nouvelles techniques associées**

La communauté scientifique dans un contexte de réduction des budgets s'inquiète non seulement de l'acquisition de nouveaux moyens analytiques, mais également du renouvellement de l'existant.

- Il existe un intérêt majeur pour les **équipements ex situ**, à l'échelle des micro- et mésocosmes pour évaluer l'adaptation/évolution du biota (impact sur le biota et son habitat, de l'élévation du niveau marin, de la température, de l'effet de la bioturbation sur l'évolution des sols, mangroves, etc.).
- Les accès aux **plateformes expérimentales nationales** sont parfois trop coûteux dans l'enveloppe financière des projets.
- Les **approches expérimentales in situ** nécessitent des investissements importants (cf. station benthique mise en place à l'embouchure du Rhône en vue d'étudier le couplage pélagique benthique), dont l'acquisition progressive par modules sur le trop long terme est un frein à l'efficacité scientifique.
- Les **campagnes de terrain**, en particulier les campagnes à la mer, devraient pouvoir être programmées rapidement pour appréhender des « événements imprévus ».
- Les développements et les déploiements de **capteurs de mesures à haute fréquence** spatiale et temporelle de la température, de niveaux d'eau, des éléments chimiques, biologiques, etc. mais aussi des flux d'eau et de particules dans les sols, les lacs, rivières, estuaires, zone côtière, est à promouvoir.
- Les mesures de traceurs de l'origine du carbone organique déposé et minéralisé ( $^{13}\text{C}$  et  $^{14}\text{C}$  du DIC) ainsi que des mesures des paramètres du système « carbonate » pour comprendre les relations complexes entre **carbone organique et inorganique**.
- Le développement d'une nouvelle branche de la biogéochimie celle des « **isotopes stables non-traditionnels** » doit se poursuivre et s'amplifier, outre l'analyse des traditionnels C, O, H, N et S, dont il faudra étudier les paires d'isotopes de  $^{15}\text{N}/^{18}\text{O}$  des nitrates,  $^{34}\text{S}/^{18}\text{O}$  des sulfates ou  $^{13}\text{C}/\text{D}$  du méthane. Il s'agit des isotopes du Fe, Zn, Hg, Ca, ou Mg par exemple.
- Les analyses à haute (voire très haute) résolution des **archives sédimentaires** doivent se développer afin de mieux cerner la réponse et l'adaptation des bassins versants et donc leurs trajectoires passées. Le développement associé de nouveaux outils portant sur la caractérisation du matériel sédimentaire dans un cadre conceptuel de source-to-sink (par ex. morphogranulométrie) est par ailleurs indispensable.
- Les effets majeurs des **alternances oxic / anoxique** (ex. vasière, zone hyporhéique, interface nappe/rivière) sur le changement de spéciation des polluants doivent aussi être mieux analysés pour être modélisés (cf. la gestion des polluants lors de levées de barrage).

Au-delà de la compréhension des mécanismes bio-géo-physicochimiques déterminant l'évolution du continuum HTM, la communauté scientifique doit s'attacher à faire converger les études en laboratoire de systèmes, dont l'échelle

spatiale va du nanomètre au mètre et les évolutions temporelles de la seconde à l'année avec la complexité a priori incompatible de l'observation de terrain d'une emprise spatiale (de  $<1$  à  $1\,000\,000\text{ km}^2$ ) et temporelle (de la minute aux millénaires).

#### **Analyses de bases de données : nouvelles approches**

Avec le développement des mesures à haute fréquence, il est important de continuer et amplifier l'effort (avec support humains et financiers) d'archivage et de mise en ligne gratuite (au moins pour des utilisations non commerciales) de données acquises sur des plateformes interdisciplinaires de l'ensemble des moyens d'observations (de terrains, aéroportés et satellitaires).

- La **transposition des données** acquises à l'échelle du laboratoire à celles du continuum est une question qui doit se poser en amont des collaborations. Par exemple: Quels formats de données expérimentales requis pour implémenter les modèles? L'interfaçage des modèles requiert par ailleurs du personnel dédié au-delà des développements spécifiques.
- En complément de ou intégrée à, la modélisation, le **traitement statistique** des données nécessite des compétences trop peu présentes dans les laboratoires des SIC, pourtant indispensables pour analyser, hiérarchiser et sélectionner les perturbations naturelles et/ou anthropiques
- Par ailleurs les données analysées en termes de **cycles de vie**, de métabolismes territoriaux pour un élément/contaminant ou une suite de contaminants (métaux, micro-plastiques, nanoparticules, micropolluants, nutriments, matériaux, etc.) permettent de comprendre et quantifier les origines, les stocks et les flux, ce qui constitue une **base de données** fondamentales pour la modélisation.
- Les **collaborations avec les Sciences Humaines de Sociales** doivent être amplifiées pour apporter leur vision nouvelle des trajectoires socio-écologiques de ces éléments, permettant de détecter et d'analyser les signaux faibles et se projeter dans des scénarios du futur.

L'étude du continuum HTM nécessite la quantification/modélisation conjointe des flux de matière et d'énergie en développant des expérimentations/chantiers multidisciplinaires allant du bassin versant amont au système côtier et des modélisations couplées. Il faut aussi encourager les projets associant dès leurs constructions les historiens et juristes de l'environnement, sociologues, géographes, urbanistes, modélisateurs, biogéochimistes, hydro-géophysiciens, statisticiens, etc., au total une combinaison de disciplines pour mieux avancer dans la compréhension et représentation du continuum Homme-Terre-Mer.



## Les chantiers et moyens d'observation

Les outils d'observations à long terme et interdisciplinaires mis en place par le CNRS à l'échelle nationales (les Zones Ateliers –ZAs– et les Observatoires Homme-milieu –OHMs) permettent de progresser sur la compréhension des socio-écosystèmes, et de leurs trajectoires. Les ZA s'inscrivent désormais dans un dispositif international (LTSER). De nombreux dispositifs nationaux (par ex., Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement –SOERE-, Services Nationaux d'Observation –SNO...), se rassemblent dans une infrastructure de recherche (IR) nationale, OZCAR. Il existe aussi un réseau distribué et coordonné en IR de **plateformes expérimentales in natura et in vitro** équipées des technologies les plus récentes –AnaEE). Ces initiatives doivent être soutenues dans la durée, mais aussi mieux partagées entre les communautés scientifiques et facilement accessibles.

Il est important de favoriser l'adaptabilité (voire l'harmonisation) des instruments et procédures pour l'enregistrement des événements majeurs dans les observatoires. Il faut aussi renforcer les liens entre les observatoires de recherche et d'autres à vocation « sociétale » dépendant d'associations ou de collectivités locales ou nationales.

Enfin, en fonction des questions scientifiques, une priorisation de site(s) et/ou objet(s) atelier pourrait être effectuée afin de ne pas disperser les forces scientifiques (notion de Point Focal, de Hot Spot qui rassemblent les compétences). Il est important que la communauté scientifique puisse s'organiser de manière efficace et constructive pour répondre à des intérêts tant scientifique que sociétaux (cf. Le Mont St Michel).

### Les moyens en personnels : besoins en compétence

D'une manière générale, il est nécessaire que des personnels soient affectés aux observatoires et aux plateformes (expérimentales et de modélisation) de manière stable afin qu'il n'y ait pas de perte de compétences.

Des recrutements ingénieur.e.s et technicien.ne.s devraient être mieux harmonisés avec ceux des chercheur.e.s en fonction des objectifs scientifiques.

Pour le continuum Homme-Terre-Mer, l'intégration, les tests et les suivis des codes de calcul sont un réel besoin. Le développement d'outils de validation et d'exploration des résultats de simulations (ex: pré et post-processing, production automatique de figures, performances et analyse statistiques) est aussi une activité à pourvoir dans ce cadre. Des compétences en programmation dans le domaine scientifique et le développement de codes complexes sont donc nécessaires (python, Fortran, C...), avec une maîtrise des outils de gestion de codes sources (ex: git, svn), des environnements Unix, Linux et Windows et des outils de couplage d'exécutables (ex: Palm) et de différenciation automatique (ex: taf).

Les techniques de calcul intensif, des outils de parallélisation et d'optimisation, la connaissance en systèmes d'information géographique (SIG) et systèmes de gestion et de manipulation de bases de données sont aussi des compétences requises.

Dans le domaine de l'expérimentation et de l'analyse en laboratoires, mais aussi sur le terrain, les ingénieur.e.s et technicien.ne.s doivent être formé.e.s à la mesure haute fréquence (récupération des données par télétransmission, la validation et traçabilité des données). La conception de bases de données dynamiques, incluant des types de données différentes, quantitatives ou qualitatives, à haute fréquence ou ponctuelles, est aussi une activité à mettre en œuvre dans le cadre du continuum HTM.

Les recherches de données d'archives historiques, celles des statistiques (chroniques INSEE, Agricoles, EUROSTAT, FAO...) destinées à alimenter les bases de données, constituent aussi des domaines, pour les lesquels les chercheur.e.s en Sciences Humaines et Sociales sont en général trop peu assisté.e.s.

Enfin, pour que les recherches soient ouvertes à la société, des chargés de communications, des facilitateurs du débat public pourraient faciliter les échanges au sein du triptyque « Scientifiques-Société civile-Gestionnaires ».

## RELATION AVEC LES OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE (ODD)

- L'aspect multidimensionnel et transversal est une caractéristique majeure des ODD. L'approche continuum HTM peut apporter cette dimension en conjuguant plusieurs cibles pour 5 des 17 ODD (6: Eau propre et assainissement, 11: Ville et communauté durable, 13: Lutte contre le changement climatique, 14: Vie aquatique, 14: Vie terrestre).
- Les ODD sont associés à des indicateurs pour suivre leurs chances d'atteinte à l'horizon 2030. Par exemple, les évolutions de l'indice de pollution des cours d'eau (nitrate, orthophosphates) et de l'indice de pollution des eaux souterraines (nitrates) sont des indicateurs de l'objectif 6. Dans ce cadre, l'indicateur ICEP (indicator of coastal eutrophication potential) considère que l'eutrophisation nécessite une connaissance croisée et interactive des grands cycles C, N, P, Si, rarement analysés ensemble (Billen & Garnier, 2007). Cet indicateur va servir de référence à la commission IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission) de l'UNESCO. Un groupe de réflexion est en activité pour la mise en place de l'ICEP pour le 14<sup>e</sup>, voire 6<sup>e</sup> SDG (sustainable development goal ou ODD –objectifs de développement durable) pour 2020.
- Plus généralement, des indicateurs couvrant l'ensemble du continuum H/T/M pour un objectif donné peuvent apporter un éclairage intégrateur sur l'évolution d'un territoire.

## RELATIONS AVEC LES PORTEURS D'ENJEUX : DÉCIDEURS PUBLICS, COLLECTIVITÉS, GRANDS PUBLIC...

Les programmes de recherches sur les bassins versant, les PIREN, programmes Interdisciplinaires de Recherche pour l'Environnement, lancés par le CNRS dès la fin des années 1970, ont donc eu très tôt la vocation d'impliquer les acteurs de l'eau (gestionnaire, collectivités) dans un contexte généralisé de l'eutrophisation des eaux de surface (Vollenweider,



1968), mais plus généralement pour améliorer la compréhension du fonctionnement des interactions entre milieu et société. Plus récemment, des projets du programme LITEAU sur les zones côtières ont rassemblé non seulement décideurs et collectivités mais aussi les acteurs citoyens. Si cette démarche est productive tant en terme de recherche fondamentale qu'appliquée, il apparaît que le plus souvent les liens se font et se défont au rythme des durées des projets. La zone atelier (ZA) Seine (CNRS-INEE), apparaît dans ce cadre, l'outil le plus pérenne, réunissant désormais le programme PIREN-Seine (initié en 1989), le GIP-Seine Aval (initié en 1995) et le programme OPUR (initié en 1994) tous financés par les décideurs et collectivités, outre les établissements (CNRS, Universités, INRA, IRSTEA... à travers les salaires notamment). Le continuum Rhône Méditerranée structure également de longue date plusieurs zones ateliers (ZABR, ORME), OHM (Littoral Méditerranée, Bassin Minier de Provence) et acteurs scientifiques et techniques du Plan Rhône. La zone atelier Brest Iroise (ZABrI), plus récente (créée en 2012) s'étend de la rade de Brest à la mer d'Iroise, depuis les bassins versants jusqu'aux îles. Le lien entre ces ZAs et le public reste toutefois sans doute trop timide. Le montage et le maintien d'un triptyque chercheurs-manageurs-citoyens sont en effet très consommateurs de temps et doivent reposer sur des compétences qui n'existent pas forcément dans les laboratoires.

Le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, à l'origine du programme LITEAU coordonne également des actions directement en lien avec les problématiques de la dynamique du littoral. Ainsi dans le prolongement des recommandations du Grenelle de la mer, la France s'est dotée en 2012 d'une stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte (SNGTC) et d'un premier programme d'actions avec l'ambition de renforcer la connaissance sur le trait de côte et de favoriser la mise en place de stratégies locales pour adapter les territoires aux évolutions du littoral. Les scientifiques se doivent d'être présents dans ce type d'initiative en apportant leur connaissance des processus. Par exemple, le Réseau National des Observatoires du Trait de Côte directement issu de la SNGTC s'appuie à l'échelle locale sur les acteurs et les démarches existantes. Ce réseau, en lien avec les SNO, a vocation à fédérer les observatoires en place et à faciliter l'émergence de nouveaux observatoires sur les territoires qui n'en sont pas dotés afin de renforcer la connaissance sur le trait de côte. Une difficulté est

de nouveau le temps disponible des chercheurs pour participer à ces initiatives parfois chronophages.

Les directives européennes et leurs mises en applications offrent aussi un cadre général aux études scientifiques. La directive cadre sur l'eau (2000/60/CE) définit un cadre pour la gestion et la protection des eaux par grand bassin hydrographique au plan européen avec une perspective de développement durable; la directive-cadre stratégie pour le milieu marin (2008/56/CE) offre un cadre global pour coordonner les actions locales des États membres, avec l'objectif de préserver le milieu marin, (I) en limitant la dégradation de la diversité biologique et les modifications de sa structure (disparition des habitats), (II) en réduisant les contaminations par les nutriments mais aussi par substances dangereuses et (III) en prenant compte des impacts liés au changement climatique. Avec la Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC, mise en œuvre en 2004 en France), qui doit répondre aux problèmes tels que l'intensification et la densification croissante des activités humaines, exacerbée sur les littoraux, il existe désormais des démarches et des outils de gouvernance, pour que les scientifiques s'approprient de manière intégrée le continuum Homme-Terre-Mer. De plus, le conservatoire du littoral (créé dès 1975) agit en faveur d'une protection définitive des espaces naturels et des paysages par une politique foncière d'acquisition.

## CONCLUSION

L'atelier du continuum Homme-Terre-Mer ne prétend évidemment pas s'attribuer tous les aspects de la présente prospective. Son objectif est d'insister sur une vision intégrative des processus, des données, des modèles en se focalisant sur les milieux d'interfaces aux conditions particulières afin de comprendre les transferts et transformations dans l'ensemble du continuum et *in fine* de construire une ou des plateformes de modélisations capables non seulement d'en rendre compte, mais aussi de les prédire dans un contexte de changement global engendré par les activités humaines. L'étude des trajectoires du passé prend, dans ce cadre intégratif et inter/trans-disciplinaire, une dimension spatiale inédite. La matérialité du continuum HTM ne peut aboutir sans une volonté et un soutien des institutions facilitant cette mise en œuvre d'interdisciplinarité autour d'un objet intégrateur et de compétences techniques identifiées.

## RÉSUMÉ EXÉCUTIF

**L'étude du continuum Homme-Terre-Mer nécessite de rassembler les compétences interdisciplinaires, pour une intégration des connaissances existantes et des outils (données, modèles, concepts). Moyens humains et équipement spécifiques sont indispensables pour combler les lacunes aux interfaces. La compréhension du Continuum HTM dans ses dimensions spatiales, temporelle (historique), et ses changements d'échelles seule permettra de concevoir et proposer des actions pour un environnement durable.**



# NOUVELLES MÉTHODES ET NOUVELLES TECHNIQUES DE DÉVELOPPEMENT INSTRUMENTALES

## RÉSUMÉ GLOBAL

L'appropriation par la communauté SIC de nouveaux champs disciplinaires est possible grâce aux « Nouvelles méthodes et nouvelles techniques de développement instrumentales ». En particulier, les avancées technologiques liées au développement et à l'utilisation de capteurs ont été soulignées. De même, l'utilisation de la modélisation analogique ou de la micro-fluidique permet de concevoir des microréacteurs pour l'étude des mécanismes de transfert et/ou de transformation des éléments. De plus, afin de renforcer les synergies au sein de la communauté SIC, certains besoins ont été identifiés tel que favoriser/faciliter l'accès aux grands équipements et dispositifs expérimentaux (écotrons, mésocosmes). Ceci implique des actions de communication, sensibilisation, formation ou bien encore d'aide au montage des propositions. Enfin, un besoin reconnu est d'accroître les compétences collectives de notre communauté concernant les modes de traitement des données de type *big data* ou chimométrie pour soutenir les initiatives sur le transfert d'échelle et la représentativité des résultats.

## INTRODUCTION

Les Surfaces et interfaces continentales sont façonnées par l'interaction entre les roches, les sols, l'eau, l'air et les organismes vivants. Cette zone critique, hébergeant des ressources essentielles, est un lieu d'intenses transferts et flux de matière appelée. Le cycle, la transformation et la bio-disponibilité des éléments y sont grandement gouvernés par les interactions entre le vivant et le minéral. De fait, les questions scientifiques que notre communauté aborde en étudiant cette zone critique nécessitent une caractérisation des mécanismes et processus hydro-bio-physico-chimiques à différents niveaux d'intégration, du bassin versant jusqu'à l'échelle atomique. De plus les SIC se positionnent à l'interface de nombreuses disciplines confrontant les points de vue de géologues, géochimistes, géomorphologues, géophysiciens, écologues, biologistes (moléculaires), biogéochimistes, hydrologues, microbiologistes, écotoxicologues et bien d'autres. Ces spécificités se répercutent sur la diversité des outils, techniques et expérimentations mis en œuvre, et nécessitent parfois de poursuivre leur développement afin de les pousser hors de leurs champs d'application initiale.

## De la prospective SIC 2013 à la prospective SIC 2017

Les verrous identifiés en 2013 se basaient sur la spécificité des échantillons et systèmes que nous abordons au quotidien. Si l'on se focalise par exemple, sur la dynamique des contaminants, les spécificités restent similaires. En effet, les niveaux de contaminations (en particulier organique) sont faibles (nano-grammes pour les hormones stéroïdiennes) et les matrices complexes. Il convient également d'aborder les multi-contaminations, en intégrant la variabilité spatiale et temporelle des systèmes.

Néanmoins les verrous techniques et scientifiques identifiés lors de la prospective SIC de 2013 ont en partie évolué, notamment, grâce à différentes initiatives comme l'EQUIPEX CRITEX pour le développement d'un parc d'instruments géochimiques et géophysiques ainsi que la mise en place d'infrastructures d'observation et d'expérimentation telles qu'OZCAR (Observatoires de la Zone Critique Applications et Recherches ; regroupant entre autres les réseaux H+ et RBV). De même des dispositifs de type Écotrons, Mésocosmes sont désormais opérationnels et ouverts à la collaboration<sup>3</sup>. Ces sites d'études et les développements instrumentaux (à hautes fréquences spatiales et temporelles) ont permis de grandes avancées

3 - Comme par exemple les deux écotrons du CNRS-INEE, l'Ecoscope du LIEC, les Mésocosmes aquatiques du GDRI iCEINT CEREGE, ECOLAB et LIEC, la création de la plateforme ROVALTAIN...



scientifiques pour la mesure et le suivi des systèmes hydrologiques, hydrogéologiques et bio-géochimiques.

La mise en place de plateformes de caractérisation (géo) chimique, isotopiques, d'imagerie, dans le cadre des « investissements d'avenir » comme par exemple les projets ASTER, Eco-X ou Nano-ID permettent des progressions très significatives en termes de limite de détection, résolution spatiale et imagerie 3D.

Toutefois, de nombreux verrous scientifiques persistent. En premier lieu, le transfert d'échelle représente toujours un défi majeur de nos communautés. Comment relier les données ponctuelles acquises sur le terrain, à des résultats obtenus en continu dans des dispositifs de laboratoire ? Comment associer modélisation géochimique et biologique ? De même les faibles concentrations de certains éléments mettent en défaut de nombreux outils de caractérisation au laboratoire et rendent la mesure *in situ* toujours complexe. De plus, notre communauté a identifié des technologies ou approches issues d'autres domaines que les SIC pourrait mieux intégrer dans ses projets.

Suite aux retours sur le site web de la prospective, (<https://sic.sciencesconf.org/>), l'atelier a permis d'organiser 3 débats sur la forme d'un « world cafe » (3 x 30 minutes) concernant :

- Les expérimentation du laboratoire au terrain, en passant par les mésocosmes.
- Les capteurs : de l'*in situ* à l'intégration spatio-temporelle
- Les besoins et challenges analytiques: analyses isotopiques et approches moléculaires

Voici dans la partie suivante les priorités que notre atelier a identifiées en lien avec les développements technologiques et méthodologiques.

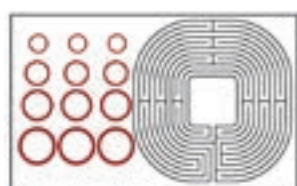
## LES PRIORITÉS IDENTIFIÉES

### Dispositifs expérimentaux : du laboratoire au terrain, en passant par les mésocosmes

#### Modélisation analogique, micro-fluidique et micro-réacteurs

La compréhension des mécanismes de transfert et/ou de transformation des éléments nécessite des expérimentations en laboratoire sur des dispositifs de petites tailles, très instrumentés. Les développements récents de la micro-fluidique représentent une réelle opportunité pour notre communauté de développer des « réacteurs » modèles capables de tester des hypothèses mécanistiques précises. Serait-il possible de reproduire des chemins réactionnels ou métabolique en les découplant, en testant les paramètres un par un ? Grâce aux développements récents de l'impression 3D et de découpe laser, il est possible de concevoir par exemple des réseaux poreux de géométrie parfaitement contrôlée (Otten *et al.*, 2012), de réaliser des micro-réacteurs de formes complexes et de les assembler avec des composants issus de la micro-fluidique. Certaines équipes étrangères se sont appropriées les concepts de la micro-fluidique en Sciences de l'Environnement, développant par exemple des dispositifs capables de recréer des environnements spécifiques et habitats de micro-organismes (bactéries, plancton, etc.) (Jokerst *et al.*, 2012; Son *et al.*, 2015; Pol *et al.*, 2017). Ces technologies et concepts permettent un élargissement réel du champ des possibles, sur le modèle des dispositifs développés en Biologie. Par exemple, notre communauté pourrait s'inspirer des dispositifs développés en toxicologie

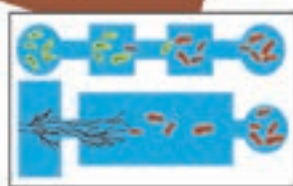
Decoupler les différents compartiments grâce à la microfluidique ?



Simuler l'hétérogénéité spatiale (réseau poreux)

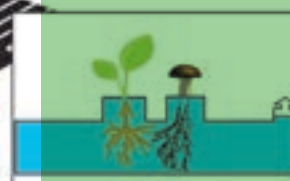


Créer des gradients chimiques et des patches



Manipuler les interactions microbiennes

Schéma illustrant le concept de « build you own soil » à partir des développements récents en microfluidique (adapté de (Alekkett *et al.*, 2018); <https://openclipart.org>)



Etudier des interactions rhizosphériques

appelés 'Multi Organs on chips (SETM-3D)', qui « *allient la complexité de la culture des micro-organes en trois dimensions, issus de cellules souches embryonnaires humaines à la technologie de la micro-fluidique et l'intégration de capteurs spécifiques tout le long du système* ».

Sur ce modèle, peut-on envisager des dispositifs capables de mieux reproduire la complexité de l'action du vivant dans les écosystèmes de surface et développer des « Ecosystem on a chip » (Stanley *et al.*, 2016) ou même « build your own soil » (Alekkett *et al.*, 2018). Ce champ nouveau pour notre domaine nécessite, comme pour d'autres dispositifs expérimentaux, de définir les volumes représentatifs, d'établir les bases théoriques pour une extrapolation aux plus grandes échelles spatiales et temporelles.

### Les approches intermédiaires écotrons / mésocosmes

L'atelier a permis de souligner, en parfait accord avec plusieurs ateliers de prospectives CNRS-INEE, (Prospectives de Bordeaux, CNRS-INEE, 2017), combien l'expérimentation en sciences de l'environnement a connu des avancées majeures, principalement en développant des dispositifs à des échelles intermédiaires (Écotrons CNRS-INEE de Foljuif et Montpellier, Ecoscope du LIEC, Mésocosmes aquatiques du GDRi ICEINT CEREGE, ECOLAB et LIEC, etc.) capables d'intégrer plus fortement la complexité des systèmes étudiés. Les Écotrons de Foljuif et Montpellier par exemple sont des dispositifs expérimentaux originaux et technologiquement avancés (Prospectives de Bordeaux, CNRS-INEE, 2017) qui commencent à être copiés en Europe.

Ces dispositifs à l'échelle nationale et même internationale, sont désormais accessibles à la communauté. Néanmoins des verrous scientifiques existent toujours afin d'extrapoler les données issues des mésocosmes à de plus grandes échelles, et de définir les échelles spatiale et temporelle caractéristiques des phénomènes étudiés. Les aspects cinétiques se heurtent toujours à des verrous en liens avec les capteurs et la fréquence d'enregistrement des signaux (cf. ci-après).

Il faut enfin souligner l'existence de verrous opérationnels. En effet, les coûts d'exploitation élevés rendent difficile la mise en place des répétitions ou des expériences à long-terme.

### Expérimentations et conditions extrêmes, intenses

Quelle que soit l'échelle spatiale étudiée, la question des conditions extrêmes émerge clairement depuis l'exercice de prospective précédent. Comment prendre en compte les événements extrêmes (tempêtes, crues, etc.) mais aussi intenses (décennaux) depuis l'échelle du laboratoire jusqu'à celle des sites d'observation? De nombreuses questions techniques et scientifiques se posent. Par exemple com-

ment développer ou adapter les dispositifs pour qu'ils puissent résister à de très fortes variations? Comment assurer des enregistrements à haute fréquence dans des conditions difficiles? Les dispositifs expérimentaux d'échelle intermédiaire comme les mésocosmes, pourraient représenter un maillon important de l'approche globale. Cette question rejoint aussi la réflexion autour des Service d'Observation (SO).

### Dispositifs expérimentaux et Milieux Urbains

Les milieux urbains ont souvent été les 'parents pauvres' des actions de recherche du domaine SIC, même si des programmes de belle ampleur tels que le PIREN Seine ou des sites ateliers comme l'OTHU sont à souligner. Cette faiblesse identifiée depuis plusieurs années nécessite des actions concrètes afin de combler notre retard à l'échelle internationale. Le déficit de travaux peut être mis en parallèle d'un déficit de sites instrumentés. (*Challenge: dialogue et intérêt des communautés SIC*). Ces travaux pourraient porter sur l'hydrogéologie urbaine, l'épuration dans les jardins à macrophytes urbains, l'altération des matériaux, la qualité de l'air intérieur, les transferts et transformations de composés dans la ville (nutriments, métaux, antibiotiques, cosmétiques, ou encore les microplastiques) L'évolution d'EC2CO pourrait permettre d'afficher ce domaine dans le champ prioritaire des financements.

Évolution à 5 ans :

- Favoriser le développement de la modélisation analogique, micro-fluidique et micro-réacteurs en sciences de l'environnement :
  - à court terme : organiser des événements de communication / information auprès des utilisateurs SIC.
  - à moyen terme : utiliser EC2CO comme levier pour soutenir des projets émergents
- Stimuler et favoriser une plus grande structuration de la communauté autour des milieux urbains. (définir ce champ comme une des priorités d'EC2CO).
- Développer un groupe de réflexion autour des conditions extrêmes en s'appuyant sur les SOERE, réseaux de mésocosmes / écotrons.
- Accroître la visibilité des dispositifs expérimentaux collectifs, favoriser leur ouverture et donc leur utilisation.

### Capteurs : de l'in situ à l'intégration spatio-temporelle

La compréhension de l'impact des changements globaux nécessite une observation et une surveillance accrue de notre planète et une compréhension des grands cycles et l'étude des phénomènes complexes multi-échelles. Cette surveillance impose de disposer d'outils et techniques de caractérisation (souvent *in situ*) à haute résolution spatiale



et temporelle pour des paramètres géo-physiques, hydrologiques, chimiques et biologiques clés, ainsi que sur l'identification d'éléments et molécules faiblement concentrées (polluants émergents, éléments traces, nutriments). L'utilisation de capteurs en sciences de l'environnement est considérée par les scientifiques ayant participé à l'atelier de prospective, comme indissociable des activités d'observation, d'expérimentation et de modélisation à toutes les échelles. Ce constat, sans être récent, est largement partagé dans la communauté SIC, ainsi qu'au CNRS-INEE, comme indiqué lors de l'atelier de prospective CNRS-INEE (Prospectives de Bordeaux, CNRS-INEE, 2017). Les besoins ainsi que les verrous autour de capteurs entre les communautés SIC et CNRS-INEE sont très proches. La prospective CNRS-INEE a focalisé sa réflexion sur l'utilisation des capteurs en écologie, en identifiant les 4 grands domaines d'intérêt suivants : I) capteurs « physiologiques » (sur l'état physiologique des organismes), II) capteurs « habitus » (habitat des organismes) III) capteurs « biodiversité » (estimation de la biodiversité) IV) capteurs « vie en condition extrême ». Ces domaines recouvrent en grande partie le périmètre des SIC. Cependant, le domaine des SIC possède certains besoins qui nécessitent un développement et accompagnement spécifique dans certains domaines tels que la mesure *in situ* d'éléments chimiques et molécules en traces, de paramètres physiques, hydrologiques..., à différentes échelles. Si le développement de capteurs physico-bio-chimiques dédiés à caractériser l'environnement a progressé, caractériser et mesurer les processus aux interfaces à travers la mesure de composantes biotiques et abiotiques *in situ* reste encore très limité, tout comme l'intégration de nouvelles technologies de capteurs miniaturisés (ex. solutions microfluidiques couplés à des systèmes de détection physiques, optiques, ou électrochimiques) dans les programmes d'observation. Ces limitations sont dues à de nombreux verrous : (I) fondamentaux et technologiques (sensibilité, résolution spatiale et temporelle, robustesse, gestion de l'énergie), (II) structurels (facilité d'utilisation des technologies de capteurs, stockage et administration données), (III) un manque d'espaces de rencontres et de discussion entre les communautés qui développent des technologies de capteurs et celles qui les utilisent ; (IV) un environnement économique incitatif trop limité dans le domaine de la métrologie de l'environnement qui favorise peu l'innovation et l'émergence de nouvelles technologies de capteurs. Pourtant, **bien que des briques technologiques élémentaires à fort potentiel existent (micro-fluidique, micro/nanocapteurs, nanoparticules fon-**

**ctionnalisées...), trop peu de travaux se consacrent à leur assemblage pour aboutir à un système utilisable sur des échantillons naturels et applicable sur le terrain en conditions de contraintes réelles, et capables de mesurer des éléments, molécules, ou paramètres physiques et biologiques au niveau de leur bruit de fond naturel.** Il apparaît aussi clairement que si de nombreuses preuves de concepts existent, la plupart des technologies plafonnent à ce niveau. Il manque la majeure partie du temps des essais de fiabilisation et une validation par, et auprès des communautés utilisatrices. Dans ce contexte l'initiative et la structuration récente autour du programme d'EQUIPEX : Critex va dans le bon sens, et doit être renforcée et accompagnée et permettre de couvrir les continuums entre les écosystèmes continentaux et côtiers.

### **Accroître les échanges, structurer une nouvelle communauté**

La particularité de la communauté SIC est qu'elle nécessite, pour plus de 2/3 des participants interrogés, des compétences externes à leur laboratoire. Cela se traduit par une faible implication dans les programmes de recherche liés au développement et à l'utilisation de technologies de capteurs émergentes. Pour débloquer la situation il serait important d'accroître le niveau des connaissances de nos communautés en opérant une évolution et un renforcement de structuration permettant un rapprochement indispensable entre les laboratoires développeurs de technologies (i.e. CNRS-INSIS, CNRS-INC, CNRS-INP, INRIA), dont la technologie elle-même représente le sujet scientifique, et les laboratoires SIC utilisateurs de technologies pour lesquels l'observation du sujet d'étude motive les développements technologiques dans le domaine de la mesure *in situ* dédiés aux sciences de l'environnement.

Dans de nombreux cas, il apparaît également que la complexité de mise en œuvre de nouvelles solutions technologiques émergentes représente un frein à l'utilisation des capteurs par la communauté SIC. L'interfaçage de technologies de mesures *in situ* architecturées en réseaux autonomes, ou fonctionnant autour de l'utilisation d'applications mobiles et de smartphones apparaît comme une voie de travail plébiscitée pour piloter/administrer des technologies de capteurs tout en apportant un gain de simplicité, d'efficacité, de traçabilité et de réduction des coûts dans le domaine de la production et de la gestion de données. Le faible niveau d'implication actuel de la communauté

SIC dans le développement, l'utilisation et l'adoption de nouvelles solutions technologiques de mesures *in situ* (ex. capteurs actifs, passifs, mesures hautes fréquences) représente un frein important dans le but de mieux caractériser et comprendre les processus aux interfaces, et/ou faire des bilans de masses ou de processus à moyenne et large échelle. Investir dans cette voie de recherche représente une formidable opportunité pour augmenter la résolution spatiotemporelle des observations. Il apparaît important de développer et intégrer ces nouvelles technologies de capteurs dans 4 dispositifs complémentaires d'observation : (I) mésocosmes et écotrons comme lieu de test et de collaboration (mise au point...) (II) mesures embarquées sur vecteurs mobiles (drones, bouées, rovs, véhicules, transports en communs, etc.), (III) mesures à points fixes (bouées, stations de mesures) dans le cadre de réseaux d'observations labélisés long terme (ex. OZCAR, SOMLIT, etc.), (IV) observation participative animée par du personnel non-expert capable de générer, ou participer activement à la production de données par le développement de solutions intégrées (capteur/application mobiles/smartphone/cloud computing). L'intégration de ces approches d'observations centrées autour du développement et utilisation de capteurs doit permettre de lever les verrous de connaissances contraints par la variabilité spatiotemporelle, et l'acquisition de données à haut débit.

Évolution à 5 ans :

- création d'un groupe de travail « capteurs SIC » permettant d'avoir plus de visibilité et de faciliter les rapprochements entre communautés CNRS-INSU-SIC, CNRS-INP, CNRS-INEE et INRIAÓ;
- évolution et renforcement des compétences au sein des SIC (ex. via DT du CNRS-INSU) dans le domaine de l'électronique embarquée, des protocoles de communication sans fils, et du développement d'applications mobiles pour faciliter les interactions entre capteurs, smartphones et les technologies de cloud computing;
- accompagner le développement de capteurs innovants dans certains domaines clés des SIC tels que la mesure *in situ* d'éléments chimiques et molécules en traces, de paramètres physiques et hydrologiques;
- orienter les investissements sur le continuum : R&D capteurs + application à des échantillons réels;
- trouver un équilibre et améliorer la continuité de financements limités simples et rapides entre la MI «AO Instrumentation aux limites» (financement de preuves de concept, validation exp. Labo)=Phase 1, et EC2CO : financement des aspects validation et applications aux milieux complexes/naturels =phase 2);
- capter des financements R&D privé-publics basés sur l'innovation en sciences de l'environnement (Industriels, Startups) FUI, UE H2020.

## BESOINS ET CHALLENGES ANALYTIQUES : ANALYSES ISOTOPIQUES ET APPROCHES MOLÉCULAIRES

Comme indiqué en introduction, la communauté s'accorde sur les progrès importants réalisés depuis le précédent exercice de prospective que ce soit en termes de sensibilité, quantité d'échantillon nécessaire aux mesures, résolution spatiale. Mais la communauté est aussi tout à fait consciente des progrès qu'il reste à accomplir. Parmi ceux-ci, nous pouvons souligner :

### Spéciation moléculaire, transfert et remédiation des contaminants

La diminution des transferts des contaminants ainsi que la réduction de leurs impacts nécessitent d'identifier les mécanismes qui contrôlent leur mobilité, leur toxicité et leur dégradabilité à l'échelle moléculaire. Les recherches s'orientent en priorité vers les contaminants organiques, en relation avec les grands enjeux alimentaires et sanitaires, mais aussi les métaux stratégiques et les radionucléides dans le contexte de la transition énergétique.

Les outils spectroscopiques nécessaires à la résolution des questions de spéciation à l'échelle moléculaire s'appuient notamment sur le rayonnement synchrotron, mais aussi sur la spectroscopie de masse, pour l'identification de sources et transfert de métaux, ou pour avancer dans la connaissance de la « matière organique ». Il sera nécessaire d'améliorer les seuils de détection pour les éléments ou les molécules en traces, en intégrant la résolution spatiale à l'échelle des nano-constituants biologiques, minéraux ou d'origine anthropique (ex. nano-plastiques). À cet égard, la pérennisation et le développement d'outils spectroscopiques de pointe, notamment sur les grands instruments, constituera un enjeu majeur pour maintenir la compétitivité de la communauté SIC dans le domaine de la biogéochimie moléculaire des contaminants et la remédiation des pollutions. Il nous appartiendra de saisir les opportunités offertes par l'amélioration du flux et de la cohérence des faisceaux délivrés par le synchrotron Européen (ESRF) à la suite de son upgrade à partir de 2020, et de développer les méthodes de préparation d'échantillon adaptées. Au-delà des outils spectroscopiques, si la microscopie haute-résolution fonctionne bien pour les 'solides durs' (HR-TEM), la communauté SIC travaillant sur les matières organiques et leurs interactions avec les métaux ne dispose que de peu de moyens analytiques de type microscopie lui permettant de travailler sur la matière 'molle' (matière organique). Il serait sans doute important de favoriser un rapprochement ou une accessibilité des outils développés en Biologie/Médecine.

## **De la caractérisation statique vers la dynamique, de la caractérisation 2D/3D vers la 4D**

Un enjeu essentiel consiste à aborder la variabilité des systèmes dans le temps. Les mesures ponctuelles, aussi poussées soient-elles peuvent se révéler inappropriées par manque de représentativité statistique. Intégrer la dimension temporelle dans les analyses impose donc des technologies plus sensibles, capables de réduire les temps de comptage pour s'approcher de mesures en temps réel. Les outils de mesure, et notamment d'imagerie, doivent évoluer vers des systèmes dynamiques.

## **Techniques de caractérisation structurale et chimique non-invasives et non-destructives**

Dans de nombreux cas les échantillons associant organismes vivants, tissus et objets inorganiques se révèlent fragiles (à la coupe par exemple) et/ou sensibles (à l'air par exemple). Les outils de caractérisations nécessitant une enceinte sous vide rendent la tâche difficile et réalisable presque uniquement en laboratoire. Les développements récents de techniques tomographiques permettent d'imager, numériser, explorer et modéliser en 3D ces échantillons. Néanmoins les outils actuels de laboratoire ne permettent pas forcément de combiner les caractérisations physiques (texturales, structurales) et chimiques. Dans le contexte d'échantillons hétérogènes ou de quantité faible, ses couplages sont d'une importance primordiale. L'intégration ultérieure de techniques de caractérisation biologique sera également capitale.

## **Interactions des contaminants avec les interfaces biologiques et minérales : vers un saut d'échelle « nano-meso »**

Les interfaces biologiques et minérales ont un haut degré de complexité, limitant notre compréhension des mécanismes d'interaction.

Des études de caractérisation structurale de ces interfaces et des phases nano-minérales, à la fois via l'expérimentation *in situ* et la modélisation à l'échelle moléculaire, sont nécessaires pour avancer dans la compréhension des interactions fondamentales sous-jacentes au piégeage des contaminants, mais aussi pour faire le saut d'échelle.

En effet, l'approche « bottom-up » a été suivie par nombreuses équipes de recherche pour étudier les interactions de contaminants avec des phases simples (monominérales, molécules organiques « modèles ») sous conditions chimiques contrôlées. Ces approches, très utiles pour comprendre les fondements mécanistiques, ne permettent cependant pas de faire le pont jusqu'à l'échelle du terrain. Des études à l'échelle mésoscopique, « moyennant » les études nanoscopiques et permettant le saut d'échelle, sont nécessaires pour faire ce lien. À ce propos, des techniques « bulk » faisant le pont entre les échelles nano et micrométrique, telles que la diffusion centrale de rayons X et de neutrons, les différentes techniques de visualisation 3D (tomographie d'absorption, diffraction, ou les nouvelles approches de dif-

fusion cohérente comme la ptychographie), la modélisation « coarse-grain », ou les méthodes statistiques appliquées aux techniques spectroscopiques sont appropriées. Ce type d'étude donne accès à des paramètres physico-chimiques moyennés à l'échelle mésoscopique (coefficients de distribution, porosité, rugosité d'une interface...) qui peuvent servir comme input pour, par exemple, des modèles de transport réactif.

## **Le screening « haut-débit »**

Ce point découle en partie du passage à la « 4D » lorsque la dimension temporelle est abordée. Mais le « screening haut débit » permet aussi d'appréhender la grande hétérogénéité des systèmes d'étude, en compensant la diminution de la taille des échantillons par leur multiplication. En particulier, la transition entre les technologies de séquençage de seconde génération (aussi appelé « massive parallel sequencing » ou « next generation sequencing ») et troisième voire quatrième génération est bien entamée. Si cette évolution a lieu en biologie, la géochimie et la physico-chimie doit aussi réussir cette transition (c.f. micro-fluidique et capteurs).

## **La gestion des grands « jeux de données » : leur stockage et leur traitement**

Qu'il s'agisse de données issues des plateformes d'analyses « omiques », ou issues d'analyses géochimiques (isotopiques), spectroscopiques, microscopiques, tomographiques sur rayonnement synchrotron, etc. leur quantité a augmenté très significativement depuis le précédent exercice de prospective. Si la question du stockage et du traitement (statistique...) des « big data » est soulevée depuis longtemps, il s'agit toujours d'un facteur limitant.

## **Optimiser l'utilisation du potentiel**

Si les progrès techniques sont indéniables, la communauté considère qu'il existe encore un manque de connaissance de l'ensemble du potentiel analytique national. La complexité des financements nationaux, régionaux, Européens participe à cette mosaïque complexe des plateformes, mais le domaine SIC devrait renforcer le niveau de connaissance de l'ensemble des acteurs par une communication spécifique.

## **Maintenir le potentiel, stimuler l'innovation**

Un des enjeux majeurs pour les 5 années à venir concerne le modèle économique et la survie des nombreuses plateformes existantes. En effet, avec la baisse des moyens humains, et les moyens limités des appels d'offre type milour, la question de la maintenance reste en suspens, en particulier après la fin des financements de type EQUIPEX. Une évolution des modes de financement et de soutiens du CNRS aux outils nationaux a été engagée avec par exemple le projet REGEF. Cette dynamique doit s'étendre à l'ensemble des domaines SIC, tout en prenant bien en compte les difficultés engendrées par une plus large « centralisation » (frais

de déplacement élevés, accessibilité...). En parallèle, des plateformes plus transdisciplinaires permettraient certainement l'émergence de nouveaux travaux innovants.

Évolution à 5 ans:

- ne pas rater la transition vers le « big data », le stockage, le traitement, l'analyse des larges jeux de données;
- accroître les compétences collectives de notre communauté concernant les modes de traitement des données: outils de la chimométrie (transfert d'échelle, représentativité);
- favoriser l'accès aux grands équipements: sensibilisation, connaissance des outils, des procédures, aide au montage des propositions...;
- accompagner la fin des financements de type PIA (EQUIPEX, etc.), accroître la visibilité et la mutualisation des outils (assurer le succès du projet d'IR REGEF). Intégrer, accompagner les initiatives locales (IDEX, Feder, CPER) au niveau national *via* les OSU;
- accroître les moyens en imagerie hyperspectrale, 3D de la matière molle, en favorisant un rapprochement avec la biologie/médecine.

### LIEN AVEC LES OBJECTIFS DU DÉVELOPPEMENT DURABLE (VISION POST-COP 21)

Les dispositifs expérimentaux ainsi que les outils de caractérisation développés par le domaine SIC sont des ressources qui permettent de répondre de manière centrale aux **ODD 14** et **15** à savoir « Conserver et exploiter de manière durable les océans et les mers aux fins du développement durable » et « Préserver et restaurer les écosystèmes terrestres, en veillant à les exploiter de façon durable, gérer durablement

les forêts, lutter contre la désertification, enrayer et inverser le processus de dégradation des terres et mettre fin à l'appauvrissement de la biodiversité ». De nombreux mots clés décrits dans ces 2 ODD se superposent avec les domaines prioritaires du document de prospective. Les dispositifs expérimentaux, les plateformes analytiques contribuent indéniablement à l'**ODD 4** « Assurer l'accès de tous à une éducation de qualité, sur un pied d'égalité et promouvoir les possibilités d'apprentissage tout au long de la vie ». En effet, il existe un grand nombre d'actions de formations autour de ces dispositifs, qu'elles soient au niveau académique ou en lien avec de la formation continue. De manière plus spécifique à cet atelier, le renforcement des dispositifs expérimentaux permettant d'affiner notre compréhension de certains mécanismes de rétroactions résonne avec l'**ODD 13** « Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions » représente un objectif essentiel pour le CNRS-INSU et le domaine SIC participe activement à ce champ d'investigation. Les nombreux atouts que possèdent le CNRS-INSU et SIC en termes d'observation (ex. SOERE) doivent être sollicités dans ce but. Certains dispositifs abordent en partie les questions de production durable (cycle de vie des matériaux) et ainsi contribuent à l'**ODD 12** « Établir des modes de consommation et de production ». Nul doute que le domaine SIC possède la capacité de renforcer son rôle dans cet ODD. De manière plus globale, par la transversalité de la thématique de cet atelier sur les nouvelles méthodes et nouvelles techniques de développement instrumentales, d'autres liens avec la majorité des ODD sont prévisibles. En effet, les développements technologiques réalisés dans le cadre de la recherche SIC sont sujets à être utilisés par d'autres communautés scientifiques.

### RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Les « Nouvelles méthodes et nouvelles techniques de développement instrumentales » sont moteurs pour l'émergence de nouveaux domaines de compétence et le renforcement des ceux déjà existants. Ce document souligne pour chacun de ces 2 axes, des propositions issues de l'atelier. En particulier, l'arrivée à maturité des technologies liées à la modélisation analogique et à la microfluidique et les preuves de concept faite autour de certains capteurs permettent la prise en main de ces technologies par la communauté SIC. D'autre part, les grandes infrastructures expérimentales sont encore insuffisamment connues et des actions de communication sont nécessaires. Finalement, le travail engagé autour des *big data* et la chimométrie doit être poursuivi.





© Emmanuel Garnier (Laboratoire Chrono-environnement, CNRS)



# ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES - ALÉAS ET RISQUES

## RÉSUMÉ GLOBAL

Dans un contexte de changements globaux, l'évolution de la fréquence et de l'ampleur des événements extrêmes est avérée interpellant ainsi les sociétés sur leurs stratégies d'adaptation et/ou de mise en protection qui doivent être intégrées dans leurs politiques d'aménagement des territoires. Les communautés scientifiques sont au cœur de ces enjeux pour la production des savoirs mais également pour la prise en compte des besoins et des défis auxquels les territoires doivent faire face. Des verrous scientifiques (e.g. variabilité spatio-temporelle des aléas et des vulnérabilités associées; cascade d'aléas de nature et d'échelles spatiales et/ou temporelles distinctes) et méthodologiques (e.g. observation et modélisation multidisciplinaire; construction de la transdisciplinarité en lien avec les acteurs des territoires concernés) sont à relever et invitent à une mobilisation des communautés scientifiques par décloisonnement des disciplines, construisant, entre autres, des recherches en interaction avec les acteurs porteurs d'enjeux.

## CONTEXTE SCIENTIFIQUE, TECHNIQUE ET SOCIÉTAL, LES ENJEUX

Nos sociétés contemporaines, bien que confrontées depuis des millénaires aux aléas « d'origine naturelle » (e.g. inondation, sécheresse, tempêtes, séisme, avalanche, mouvements gravitaires...) et depuis quelques décennies aux aléas « d'origine anthropique » (e.g. rejets toxiques ponctuels ou diffus d'origines domestique, industrielle ou agricole, pollutions de fond...), doivent aujourd'hui faire face à des catastrophes dont les conséquences s'intensifient du fait du réchauffement global ainsi que de la vulnérabilité croissante de nos sociétés, liée, par exemple, à l'urbanisation galopante notamment du littoral et des vallées en zone de montagne, aménagements aberrants dans les lieux des rivières, l'imperméabilisation croissante de substrats en zones urbanisées), ou à des choix d'aménagement des paysages liés aux pratiques culturelles (comme l'arrachage des bocages) ou forestières. Ces conséquences concernent à la fois des menaces I) sur l'exposition des populations et des infrastructures aux risques naturels, II) sur la qualité des milieux (air, eau; sol) et III) sur la sécurité alimentaire, et implique par conséquent des questionnements légitimes sur la durabilité de l'occupation et de l'usage des territoires et la durabilité de notre modèle de développement.

Par ailleurs, nos économies mettent en place de nouveaux modes de production et de consommation pour répondre à la nécessité de nourrir 9 milliards d'habitants (voir 11 mil-

liards en 2050) et de pallier la finitude des ressources (mondialisation des échanges alimentaires, économie circulaire), qui sont générateurs de nouveaux risques.

De fait, les risques « en général » font partie des problèmes complexes vis-à-vis desquels la société est en demande de sécurité croissante.

Sous-jacent à cette notion de risque, la notion de « vulnérabilité du système étudié » s'impose dans la construction scientifique mobilisant des savoirs et compétences qui vont au-delà de la communauté SIC et qui appelle à des démarches d'intégration de différentes disciplines voir de co-construction de « nouvelles » disciplines.

Les enjeux de recherche visent donc une meilleure : 1) compréhension des phénomènes à l'origine des aléas, 2) caractérisation des situations extrêmes et des perturbations (ou stress environnementaux) associés, 3) compréhension des processus et leurs interactions. Il s'agit aussi de dépasser le sens et la portée des recherches effectuées depuis des années par les spécialistes en « sciences de la nature » et de l'ingénieur, en avançant en termes d'analyse des vulnérabilités, des attitudes des acteurs vis-à-vis du risque, des capacités d'anticipation et d'adaptation des systèmes et de modélisation mathématique de l'objet risque dans toute sa complexité. Les interactions avec la communauté des scientifiques des « Sciences humaines et sociales » s'imposent donc naturellement, de même qu'un effort accru de formalisation permettant de capitaliser les acquis de ces échanges.

Il s'agit ensuite que la production d'outils et des modèles technico économiques soient adaptés à la décision et la gestion des territoires ou des filières, et ce pour des gammes d'échelles de temps et d'espace très larges. Il s'agit également d'intégrer la production de ces connaissances et pratiques aux filières de formation.

Les communautés scientifiques disposent donc de l'expertise pour l'évaluation des risques et ont un rôle d'accompagnement des politiques publiques notamment afin de participer à l'élaboration des plans de prévention des risques et à l'aménagement des territoires sur la base de scénarios d'adaptations élaborés à long terme dans une démarche transdisciplinaire intégrant au maximum les multiples sources de variabilité et d'incertitude en jeu (projections, cadre multi-modèles, etc.).

## ÉTAT DE L'ART ET VEROUS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Beaucoup de travaux ont été menés sur la compréhension des **aléas naturels**, leurs origines et leurs dynamiques spatio-temporelles. Ces études concernent par exemple I) les extrêmes hydroclimatiques (i.e. précipitation extrême; sécheresse; vague de chaleur) qui impactent les milieux (i.e. biosphère; qualité et quantité des eaux continentales; sol), II) l'origine et la propagation des crues rapides, notamment dans un contexte de bassins non jaugés, III) les facteurs de déclenchement et de propagation des avalanches et IV) la récurrence des séismes dans le temps et les phénomènes d'interaction spatiale et temporelle pouvant entraîner des séismes en cascade, etc. Ces travaux s'appuient sur des séries d'observations qui pour certaines d'entre elles ne s'étendent que sur des gammes temporelles très courtes et peuvent donc souffrir d'un manque de profondeur temporelle. Par ailleurs, d'autres risques sont aujourd'hui fortement négligés. Ils concernent principalement les risques de pollution d'origine volcanique en Europe, comme ce fut le cas en 1783 et en 2010 avec les éruptions islandaises du Laki et de l'Eyjafjallajökull, ainsi que le risque de tsunami sur les littoraux européens et Méditerranéens.

Malgré le niveau de compréhension de ces aléas, plusieurs questions restent ouvertes et débattues :

- **Comment quantifier l'amplitude de l'aléa et son évolution sur des gammes d'échelles spatiale et temporelle plus larges?** Il est nécessaire de développer/mobiliser des approches multi-échelles bénéficiant d'observations

*in situ* et spatiales afin de caractériser un extrême et les risques associés à l'échelle spatiale pertinente (local, régional, global). La définition statistique de l'extrême (probabilité faible; intensité maximale) nécessite de disposer de séries longues pour minimiser l'incertitude liée au caractère transitoire des systèmes étudiés. L'établissement de ces séries longues nécessite de renforcer les liens multidisciplinaires par exemple entre les sciences paléo-environnementales et les SHS afin de construire des bases de données historiques à des données à plus long terme (10-100 ka), puis de les exploiter dans un cadre statistique approprié tenant compte du caractère composite de l'information.

- Si un aléa défini peut mener à un événement extrême isolé et ponctuel, il peut aussi mener à une succession d'**« événements extrêmes » provenant d'une cascade d'aléas de nature différente**. Citons par exemple les inondations dramatiques sur des territoires dévastés par des feux de forêt, réduisant ainsi les capacités de rétention des eaux dans le sol, ou des glissements de terrain majeurs sur des terrains initialement déstabilisés après le passage d'un séisme ou les phénomènes en cascade liées à la rupture d'une poche d'eau sous-glaciaire (avalanche de glace, lave torrentielle, etc.). Il est donc nécessaire de décroisonner les communautés qui travaillent sur ces aléas pris individuellement pour mieux comprendre les interrelations entre ces phénomènes qui peuvent constituer une source d'événements extrêmes majeurs.
- **Les enjeux d'observation long terme, à travers un développement instrumental dédié et les observatoires *in situ* associés aux données spatiales**, sont au cœur de ces questions. Les approches basées sur l'observation *in situ*/l'observation spatiale et la modélisation montrent un potentiel de plus en plus élevé. Aujourd'hui, l'observation spatiale fournit des séries temporelles de plus en plus longues avec une récurrence temporelle de plus en plus adaptée à la compréhension de la dynamique des surfaces et à l'analyse statistique des phénomènes extrêmes. Par exemple concernant les extrêmes hydro-climatiques (e.g. sécheresse), l'enjeu serait de définir des indices permettant un suivi fin des processus de sécheresse agronomique, comme outil adaptatif de l'aide à la décision et éventuellement mise en alerte précoce. Toujours concernant l'observation des phénomènes extrêmes, la mise en place et le développement de mesures automatiques de haute fréquence pourraient être encouragés afin de mieux évaluer l'impact des crues sur le domaine côtier lié aux transports de sédiments.

**La notion de risque**, au-delà de l'étude de l'aléa, doit donc s'étendre aux conséquences des activités anthropiques, de l'occupation et de l'usage du territoire, des changements globaux. La notion d'événement extrême vu par exemple par les historiens « enregistré » la signature sociale de l'événement (e.g. décès; dommages aux cultures et/ou aux infrastructures), autrement dit la catastrophe. Un événement extrême (aléa) qui aurait frappé un site dépeuplé dans le passé pourrait n'avoir laissé aucune trace dans les archives historiques; il ne serait donc pas identifié comme « événement extrême » et encore moins comme une catastrophe. On introduit donc ici la notion d'événement « impactant », socialement parlant et la nécessité de comprendre ce qui fait événement un moment donné pour pouvoir exploiter l'information sur le long terme. L'étude des risques hydro-climatiques et/ou géophysiques nécessite donc de mobiliser une approche scientifique interdisciplinaire associant des scientifiques des « bio-géosciences » à des historiens, des sociologues, des anthropologues, des psychologues et des géographes des sciences humaines. Plusieurs travaux ont été initiés dans la communauté SIC et tous s'accordent sur l'importance du temps nécessaire pour mener à bien ces recherches. Au-delà de la construction et du partage d'un langage commun, il s'agit bien de développer ensemble une démarche scientifique (observation; théorisation; conceptualisation, méthodologie, modélisation) qui puisse répondre à ces enjeux *via* des allers-retours entre disciplines. Plusieurs questions de recherche ont été identifiées:

- **La dynamique spatio-temporelle du risque est caractérisée par la coévolution de la dynamique de l'aléa et de celle de la vulnérabilité associée.** En effet, la notion d'impact et/ou de vulnérabilité est pleinement dynamique à la fois dans le temps et l'espace. Des sociétés économiquement et sociologiquement éloignées réagiront différemment à un même aléa du fait de leur organisation sociale, de leurs valeurs constitutives et de leur mémoire collective. Plus localement, en fonction du territoire, de la temporalité de l'aléa au regard de l'organisation sociale pendant cet aléa, le risque associé sera alors très différent. L'identification des événements extrêmes et leur évolution sur des temps longs nécessitent donc de dépasser le « dogme de l'inédit » et de contextualiser l'événement à la fois dans le temps et dans l'espace en rappelant des phénomènes semblables s'étant produit dans le passé ou dans d'autres régions. Une génération perçoit souvent le caractère exceptionnel de l'aléa n'ayant pas la mémoire

des événements passés ou n'ayant pas la connaissance des mêmes phénomènes s'étant produit en dehors du territoire. Il s'agit donc de développer des outils permettant une préservation de la mémoire des événements passés à l'échelle de la communauté (e.g., repères sanctuarisés, information auprès des scolaires et des communautés locales). En termes statistiques, il s'agira d'améliorer la prédétermination des aléas et des dangers et le dimensionnement fonctionnel des mesures de mitigation (ouvrages, forces de lutte, réduction des expositions, etc.) *via* la combinaison de modélisation physique, numérique, probabiliste avec des chroniques de données historiques. Trois cas de figures méritent en particulier notre attention: (I) la définition du risque hors du cadre stationnaire, (II) le cadre multivarié spatial, et (III) le lien entre les méthodes d'évaluation du risque et la théorie statistique des valeurs extrêmes.

- **L'impact des événements extrêmes sur les milieux pose également des questions ouvertes qui appellent à des démarches interdisciplinaires.** Par exemple, quels sont les effets des événements hydro-climatiques extrêmes sur la biosphère en général et les couverts agricoles en particulier (stress hydrique, résilience, rendement, etc.) et en quoi ces impacts vont-ils modifier les pratiques et usages de ces territoires. Si on décline cette question plus généralement, comment les paysages pourraient être modifiés par des événements extrêmes et inversement?
- **Les enjeux d'une observation multi et interdisciplinaire** sont majeurs et concernent une co-localisation des observations long terme, des développements d'une observation paléo-environnementale afin de disposer de séries longues, et des observations d'impacts pour l'évaluation des risques associés.
- **Progresser dans la formalisation du risque.** À l'exception de la classique (mais un peu limitée) combinaison aléa/vulnérabilité, l'effort de formalisation reste insuffisant. Il s'agit donc de réfléchir au choix de la métrique du risque (unité de mesure) qui conditionne le résultat de l'évaluation et qui, bien exprimée, permet d'aborder les questions d'acceptabilité. De même, on peut questionner le choix du paradigme décisionnel (utilité espérée, analyse multicritère, etc.) dans les approches visant à optimiser les mesures de gestion (dimensionnement d'ouvrages par minimisation des dommages moyens annuels évités par exemple), ce qui renvoie aux développements récents en science de la décision et en économie comportementale;

Démarche et enjeux pour une meilleure compréhension des événements extrêmes, de l'aléa aux risques associés.



## PRIORITÉ POUR LES ANNÉES À VENIR

- La constitution de base de données historiques sur les aléas et les impacts associés et le développement de méthodes adaptées à leur exploitation ;
- Encourager le décloisonnement des communautés qui travaillent sur les aléas pris séparément afin de mieux comprendre les événements extrêmes issus d'une cascade d'aléas et leurs impacts associés, et ce sur de longues échelles de temps. Cet effort en matière de pluridisciplinarité permettra de prendre en compte mieux et de façon plus équilibrée l'ensemble des dimensions de l'objet risque : biophysique (mécanique, rhéologie, climat, chimie, biologie, etc.), mathématique (ex. métrique, paradigme décisionnel) et socio-historique (construction, perceptions, représentations) de l'objet risque ;
- Mettre en perspective les avancées sur la compréhension des risques passés (intensité des aléas et vulnérabilité) au regard des conditions limites, et notamment prendre en compte l'état transitoire des systèmes étudiés ;
- Développer des approches multi-échelles pour identifier les événements extrêmes aux échelles des impacts associés et comprendre les processus multi-échelles associés et permettre ainsi des développements innovants de la modélisation intégrée du risque.

## IMPLICATIONS POUR LES MOYENS EN ÉQUIPEMENT, LES CHANTIERS ET MOYENS D'OBSERVATIONS, LES OUTILS PROGRAMMATIQUES, ET LES BESOINS DE COMPÉTENCE

Très clairement sur ce thème, il s'agit de décloisonner les communautés en proposant une programmation multi-instituts (INEE ; INSIS ; INSHS ; INSU) du CNRS.

Un programme « Événements extrêmes » pourrait permettre l'émergence de recherches sur les cascades d'aléas.

Renforcer la programmation/réflexion multi-organismes (*via* AllEnvi?) en s'appuyant sur les organismes qui pratiquent des recherches interdisciplinaires et en interaction avec les politiques publiques en particulier sur les risques.

Favoriser la co-localisation d'observations multidisciplinaires haute fréquence *via* des financements ciblés.

Promouvoir les recrutements interdisciplinaires au sein de tous les organismes concernés et notamment au sein des universités pour développer/renforcer des cursus interdisciplinaires en lien avec ces enjeux.

## RELATION AVEC LES ODDS

Ces recherches s'inscrivent pleinement dans le cadre des objectifs de développement durable quelques soient les régions climatiques étudiées. Assurer la sécurité alimentaire (ODD-2), garantir l'accès à l'eau potable (ODD-6), comprendre les effets des changements globaux pour prendre d'urgence des mesures permettant d'atténuer les effets des changements climatiques et leurs répercussions (ODD-13), préserver les écosystèmes (ODD-15), sont naturellement les cibles pour tous les pays et pour lesquelles de telles recherches doivent être facilitées.

## RELATIONS AVEC LES PORTEURS D'ENJEUX

Au-delà de la démarche interdisciplinaire nécessaire à mettre en place pour répondre aux verrous scientifiques, la place des acteurs semble s'imposer assez naturellement dans la construction scientifique pour répondre à aux questions déclinées ci-dessus.

L'enjeu est donc d'intégrer/promouvoir une **démarche scientifique transdisciplinaire** pour I) « traduire » les besoins exprimés par les acteurs en problématiques scientifiques qui contribuent à une meilleure compréhension du Système Terre et II) « mieux » intégrer les savoirs et expertises des acteurs dans la construction scientifique académique.

De même, positionner nos recherches dans le cadre des ODDs nous invite à la co-construction de savoirs avec des acteurs issus de sphères très différentes, où les enjeux pour notre communauté concernent entre autres, la formation (initiale et continue), le partage et/ou l'accès aux données et le rapprochement Science et Société, *via* par exemple, des **plateformes/structures interfaces** qui permettent un tel rapprochement (e.g. Animations Régionales de THEIA; Aclimaterra en Nouvelle Aquitaine; GREC-PACA en Provence Alpes Côte d'Azur; Ouranos-AuRA en Auvergne-Rhône Alpes).



# ONT CONTRIBUÉ

## ANIMATEURS D'ATELIERS ET RÉDACTEURS DES CHAPITRES

### Rôle de la communauté SIC dans l'agenda post COP 21

Thierry Lebel, Agathe Heuzen, Nicolas Arnaud et Fatima Laggoun

### Que reste-t-il de la prospective 2013-2017 ?

Corinne Leyval, Aline Dia, Frédéric Delay, François Chabaux, Nicolas Arnaud et Françoise Elbaz-Poulichet

### Comment innover aussi dans la communication de notre objet d'étude ?

Jean-Luc Probst, Bruno Latour, Alexandra Arenes, Thierry Lebel, Véronique Chagué et Nicolas Arnaud

### De l'observation à la modélisation : approches intégrées

Jeroen Sonke, Jean-Martial Cohard, Marie Paule Bonnet, Éric Ceschia, Sabine Sauvage, Frédérique Seyler, Sylvie Nazaret, Brice Boudevillain, Frédéric Frappart, Vincent Godard et Olivier Ribolzi

### Cycles longs – Cycles courts

Dimitri Lague, Anicet Beauvais et Vincent Godard

### Liens biotique – abiotique

Mélanie Auffan, Philippe Choler, Gwenaél Imfeld, Odile Bruneel, Corinne Casiot, Françoise Elbaz-Poulichet et Jérôme Rose

### La matière organique dans tous ses états

Pierre Barré, Tiphaine Chevallier, Roman Teisserenc, Fatima Laggoun, Éric Chauvet, Cécile Monard, Laurent Jeanneau et Bertrand Guenet

### Interface entre la basse atmosphère et les surfaces continentales

Gilles Bergametti, Isabelle Calmet, Beatrice Bechet, Jean-Emmanuel Sicart, Jean Martins, Tiphaine Talleg, Anne Probst et Gineth Saracco

### Le continuum Homme-Terre-Mer

Josette Garnier, Bruno Castelle, Jérôme Labille, Philippe Souchu, Vincent Thieu et Christophe Delacourt

### Nouvelles méthodes et nouvelles techniques de développement instrumentales

Émilie Muller, Damien Jougnot, David Point, Clément Levard, Jérôme Rose, Aline Dia, Mélanie Davranche, Guillaume Morin, Géraldine Sarret, Alejandro Fernandez-Martinez et Laurent Charlet

### Événements Extrêmes - Aléas et Risques

Sandrine Anquetin, Lucilla Benedetti et Emmanuel Garnier

## CONTRIBUTEURS AUX TEXTES ET PARTICIPANTS AU COLLOQUE DE PROSPECTIVE

Clément Albergel, Nadir Amarouche, David Amouroux, Andrieu-Ponel Valérie, Sandrine Anquetin, Alexandra Arènes, Fabien Arnaud, Nicolas Arnaud, Melanie Auffan, Nadia Ayoub, Sophie Ayrault, Nicolas Baghdadi, Barange Claire, Pierre Barré, Pascale Bauda, Anicet Beauvais, Béatrice Bechet, Sauveur Belviso, Lucilla Benedetti, Marc Benedetti, Karim Benzerara, Annette Bérard, Cécile Bernard, Isabelle Bertrand, Stéphane Betoulle, Sylvain Biancamaria, Céline Billiere, Juliette Blanchet, Marie-Paule Bonnet, Julien Bouchez, Brice Boudevillain, Christel Bouet, Olivier Bour, Aude Bourin, François Bourrin, Lorenzo Bramanti, Isabelle Braud, Pascal Breil, Xavier Briottet, Odile Bruneel, Yves Brunet, Hélène Budzinski, Damien Calmels, Isabelle Calmet, Marie Camredon, Thierry Caquet, Damien Cardinal, Corinne Casiot, Bruno Castelle, Nada Caud, Éric Ceschia, François Chabaux, Véronique Chagué, Cédric Champollion, François Charles, Laurent Charlet, Éric Chassefière, Éric Chauvet, Ghani Chehbouni, Selma Cherchali, Tiphaine Chevallier, Philippe Choler, Christophe Cloquet, Jean-Martial Cohard, Patrice Coll, Yoann Copard, Dominique Courault, Marie-Agnès Courty, Denis Couvet, Olivier Crouzet, Jean-Raynald De Dreuzy, Maxime Debret, Corinne Dejours, Christophe Delacourt, Aurélie Delavaud, Frederick Delay, Claire Delon, Jerome Demarty, Sylvie Derenne, Aline Dia, Marie-France Dignac, David Doxaran, Laurent Drapeau, Jean-Louis Drouet, Marie-Lise Dubernet, Véronique Ducrocq, Jean-Charles Dupont, Véronique Durand, Pascale Ebner, Nicolas Eckert, Françoise Elbaz-Poulichet, Gérard Eldin, Éric Gayer, Agathe Euzen, Olivier Evrard, Frédérique Eynaud, Pierre Faure, Hélène Fenet, Catherine Fernandez, Alejandro Fernandez-Martinez, Éric Ferrage, Pierre Flamant, Patrick Flammarion, Nicolas Flipo, Gilles Foret, Olivier Fouche-Grobla, Najla Fourati, Matthieu Fournier, Frédéric Frappart, Jérôme Gaillardet, Sylvie Galle, Albert Galy, Alexandre Ganachaud, Laure Gandois, Emmanuel Garnier, Josette Garnier, Chantal Gascuel-Oudou, Catherine Gayda, Frédéric Gazeau, Alexandre Gelabert, Dominique Genty, Maryvonne Gérin, Laure Giamberini, Élisabeth Gibert-Brunet, Franck Gilbert, Vincent Godard, Patrice Gonzalez, Aline Gratien, Christophe Grenier, Gérard Gruau, Bertrand Guenet, Roger Guérin, Julien Guillemoteau, Katell Guizien, Florence Habets, Christine Hatté, Danièle Hauser, Thierry Heulin, Agathe Heuzen, Hugue Arnaud t, Frédéric Huynh, Gwenaël Imfeld, Jérémy Jacob, Jardani Abderrahim, Laurent Jeanneau, Damien Jougnot, Hervé Jourde, Julien Fouché, Laurent Kergoat, Pierre Kern, Jérôme Labille, Robert Lafite, Fatima Laggoun, Alain Lagrange, Dimitri Lague, Bruno Lanson, Christophe Larroque, Bruno Lartiges, Jean-Christophe Lata, Bruno Latour, Tanguy Le Borgne, Anne Le Goff, Gaël Le Roux, Thierry Lebeau, Thierry Lebel, Guillaume Leduc, Clément Levard, Corinne Leyval, Anne Lieutaud, Nathalie Long, Laurent Longuevergne, Pascal-Jean Lopez, Antoine Lucas, Wolfgang Ludwig, Sylvain Mahe, Gil Mahe, Philippe Maisongrande, Benjamin Marie, Christelle Marlin, Béatrice Marticorena, Éric Martin, Jean Martins, Armand Masion, Nicolas Massei, Pascal Maugis, Éric Mazaud, Yves Meheust, Valérie Mesnage, Jean Michel Metivier, Régis Moilleron, Jérôme Molenat, Cécile Monard, Hélène Montelly, Jean-Pierre Montoroi, Sabine Moraud, Marie-Christine Morel, Guillaume Morin, Lou Morin, Mikael Motelica-Heino, Emmanuel Mouche, Christian Mouglin, Émilie Muller, Florence Naaim, Mohamed Naaim, Nunan Naoise, Behzad Nasri, Sylvie Nazaret, Fabrice Not, Catherine Otle, Guillaume Paris, Paul Passy, Fabienne Petit, Christophe Peugeot, Philippe Peylin, Marie-Claire Pierret, Christophe Piscart, David Point, Franck Poitrasson, Pierre Polsenaere, Jean-Luc Probst, Anne Probst, Cécile Quantin, Katell Quenea, Christophe Rabouille, Sétareh Rad, Jean Louis Rajot, Philippe Riou, Olivier Ribolzi, Agnès Riviere, Henri Robain, Emma Rochelle-Newall, Jérôme Rose, Juliette Rosebery, Mandana Saheb, Maria Fernanda Sanchez Goni, Jose Miguel Sanchez Perez, Ginette Saracco, Géraldine Sarret, Sabine Sauvage, Nicolas Savoye, Sabine Schmidt, Éric Servat, Patrick Seyler, Frédérique Seyler, Delphine Six, Jeroen Sonke, Aldo Sottolichio, Laure Soucémariadin, Philippe Souchu, Thomas Stieglitz, Ollivier Tamarin, Roman Teisserenc, Emmanuel Tertre, Vincent Thieu, Nicolas Thouveny, Gérard Thouzeau, Luis Tito De Morais, Michael Toplis, Marie-George Tournoud, Claire Treignier, Christian Valentin, Pieter Van Beek, Delphine Vantelon, Nathalie Vigier, Davide Vignati, Éric Viollier, Sylvain Weill, Lucile Wittersheim, Chouki Zerrouki et Mehrez Zribi

## RÉFÉRENCES

### De l'observation à la modélisation : approches intégrées

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Howell, T. A. & Jensen, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management* 98, 899–920 (2011).
- Arnold, J., Srinivasan, R., Muttiah, R. & Williams, J. R. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 34, 73–89 (1998).
- Arnold, J.G. et al. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE* 55, 1491–1508 (2012).
- Beaujouan, V., Durand, P., Ruiz, L., Aurousseau, P. & Cotteret, G. A hydrological model dedicated to topography-based simulation of nitrogen transfer and transformation: rationale and application to the geomorphology–denitrification relationship. *Hydrological Processes* 16, 493–507 (2002).
- Brisson, N. et al. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311–346 (1998).
- Brisson, N. et al. STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22, 69–92 (2002).
- Duchemin, B. et al. Impact of Sowing Date on Yield and Water Use Efficiency of Wheat Analyzed through Spatial Modeling and FORMOSAT-2 Images. *Remote Sensing* 7, 5951–5979 (2015).
- Ferrant, S. et al. Agro-hydrology and multi-temporal high-resolution remote sensing: toward an explicit spatial processes calibration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 5219–5237 (2014).
- Gallego-Elvira, B. et al. EVASPA (EVapotranspiration Assessment from SPace) tool: An overview and first assessments. in *Procedia Environmental Sciences* 19, (2013).
- Hamilton, S. H., ElSawah, S., Guillaume, J. H. A., Jakeman, A. J. & Pierce, S. A. Integrated assessment and modelling: Overview and synthesis of salient dimensions. *Environmental Modelling & Software* 64, 215–229 (2015).
- Krinner, G. et al. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles* 19, (2005).
- Le Page, M. L. et al. An Integrated DSS for Groundwater Management Based on Remote Sensing. The Case of a Semi-arid Aquifer in Morocco. *Water Resour Manage* 26, 3209–3230 (2012).
- Martin, E. et al. On the Use of Hydrological Models and Satellite Data to Study the Water Budget of River Basins Affected by Human Activities: Examples from the Garonne Basin of France. *Surv Geophys* 37, 223–247 (2016).
- Masson, V. et al. The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geosci. Model Dev.* 6, 929–960 (2013).
- Ramos, M.-H., Mathevet, T., Thielen, J. & Pappenberger, F. Communicating uncertainty in hydro-meteorological forecasts: mission impossible? *Meteorological Applications* 17, 223–235 (2010).
- Thérond, O. et al. Integrated modelling of social-ecological systems: The MAELIA high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems. in *7<sup>th</sup> International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs 2014)* (2014).
- Van Der Leeuw, S. E. Archaeomedes, un programme de recherches européen sur la désertification et la dégradation des sols. *Natures Sciences Sociétés* 6, 53–58 (1998).
- Vintrou, E. et al. A comparative study on satellite- and model-based crop phenology in West Africa. *Remote Sensing* 6, 1367–1389 (2014).

### Liens biotique – abiotique

- Bond WJ, Woodward FI, Midgley GF (2005) The Global Distribution of Ecosystems in a World without Fire. *New Phytologist* 165: 525-537.

- Brovkin V, van Bodegom PM, Kleinen T, Wirth C, Cornwell WK, Cornelissen JHC, Kattge J (2012) Plant-Driven Variation in Decomposition Rates Improves Projections of Global Litter Stock Distribution. *Biogeosciences* 9: 565-576.
- Charlet L, Morin G, Rose J, Wang Y, Auffan M, Burnol A, Fernandez-Martinez A (2011) Reactivity at Mineral-Water Interfaces, Redox Processes, and Arsenic Transport in the Environment. *CR Geosciences* 343: 123-139.
- Cornwell WK, Cornelissen JHC, Amatangelo K, Dorrepaal E, Eviner VT, Godoy O, Hobbie SE, Hoorens B, Kurokawa H, Perez-Harguindeguy N, Quested HM, Santiago LS, Wardle DA, Wright IJ, Aerts R, Allison SD, van Bodegom P, Brovkin V, Chatain A, Callaghan TV, Diaz S, Garnier E, Gurvich DE, Kazakou E, Klein JA, Read J, Reich PB, Soudzilovskaia NA, Vaieretti MV, Westoby M (2008) Plant Species Traits Are the Predominant Control on Litter Decomposition Rates within Biomes Worldwide. *Ecology Letters* 11: 1065-1071.
- De Frenne P, Rodriguez-Sanchez F, Coomes DA, Baeten L, Verstraeten G, Vellend M, Bernhardt-Romermann M, Brown CD, Brunet J, Cornelis J, Decocq GM, Dierschke H, Eriksson O, Gilliam FS, Hedl R, Heinken T, Hermy M, Hommel P, Jenkins MA, Kelly DL, Kirby KJ, Mitchell FJG, Naaf T, Newman M, Peterken G, Petrik P, Schultz J, Sonnier G, Van Calster H, Waller DM, Walther GR, White PS, Woods KD, Wulf M, Graae BJ, Verheyen K (2013) Microclimate Moderates Plant Responses to Macroclimate Warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110: 18561-18565.
- Ellis EC, Ramankutty N (2008) Putting People in the Map: Anthropogenic Biomes of the World. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6: 439-447.
- Friedlingstein P, Bopp L, Ciais P, Dufresne JL, Fairhead L, LeTreut H, Monfray P, Orr J (2001) Positive Feedback between Future Climate Change and the Carbon Cycle. *Geophysical Research Letters* 28: 1543-1546.
- Gimenez O, Buckland ST, Morgan BJT, Bez N, Bertrand S, Choquet R, Dray S, Etienne M-P, Fewster R, Gosselin F, Merigot B, Monestiez P, Morales JM, Mortier F, Munoz F, Ovaskainen O, Pavoine S, Pradel R, Schurr FM, Thomas L, Thuiller W, Trenkel V, de Valpine P, Rexstad E (2014) Statistical Ecology Comes of Age. *Biology Letters* 10.
- Guédron S, Point D, Acha D, Bouchet S, Baya PA, Tessier E, Monperrus M, Molina CI, Groleau A, Chauvaud L, Thebault J, Amice E, Alanoca L, Duwig C, Uzu G, Lazzaro X, Bertrand A, Bertrand S, Barbraud C, Delord K, Gibon FM, Ibanez C, Flores M, Fernandez Saavedra P, Ezpinoza ME, Heredia C, Rocha F, Zepita C, Amouroux D (2017) Mercury Contamination Level and Speciation Inventory in Lakes Titicaca & Uru-Uru (Bolivia): Current Status and Future Trends. *Environmental Pollution* 231: 262-270.
- Hendren CO, Lowry M, Grieger KD, Money ES, Johnston JM, Wiesner MR, Beaulieu SM (2013) Modeling Approaches for Characterizing and Evaluating Environmental Exposure to Engineered Nanomaterials in Support of Risk-Based Decision Making. *Environmental Science & Technology* 47: 1190-1205.
- Hooper DU, Vitousek PM (1997) The Effects of Plant Competition and Diversity on Ecosystem Processes. *Science* 277: 1302-1305.
- Hubbell SP (2001) *The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Lavorel S, Garnier E (2002) Predicting Changes in Community Composition and Ecosystem Functioning from Plant Traits: Revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology* 16: 545-556.
- Levin SA (1992) The Problem of Pattern and Scale in Ecology. *Ecology* 73: 1943-1967.
- Lowry GV, Espinasse BP, Badireddy AR, Richardson CJ, Reinsch BC, Bryant LD, Bone AJ, Deonaraine A, Chae S, Therezien M, Colman BP, Hsu-Kim H, Bernhardt ES, Matson CW, Wiesner MR (2012) Long-Term Transformation and Fate of Manufactured Ag Nanoparticles in a Simulated Large Scale Freshwater Emergent Wetland. *Environmental Science & Technology* 46: 7027-7036.
- Luttropp C, Lagerstedt J (2006) Ecodesign and the Ten Golden Rules: Generic Advice for Merging Environmental Aspects into Product Development. *Journal of Cleaner Production* 14: 1396-1408.
- McGill BJ, Enquist BJ, Weiher E, Westoby M (2006) Rebuilding Community Ecology from Functional Traits. *Trends in Ecology & Evolution* 21: 178-185.

- Pitman AJ (2003) The Evolution of, and Revolution in, Land Surface Schemes Designed for Climate Models. *International Journal of Climatology* 23: 479-510.
- Reichstein M, Bahn M, Mahecha MD, Kattge J, Baldocchi DD (2014) Linking Plant and Ecosystem Functional Biogeography. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111: 13697-13702.
- Sturm M, McFadden JP, Liston GE, Chapin FS, Racine CH, Holmgren J (2001) Snow-Shrub Interactions in Arctic Tundra: A Hypothesis with Climatic Implications. *Journal of Climate* 14: 336-344.
- Ustin SL, Gamon JA (2010) Remote Sensing of Plant Functional Types. *New Phytologist* 186: 795-816.
- Van Bodegom PM, Douma JC, Witte JPM, Ordonez JC, Bartholomeus RP, Aerts R (2012) Going Beyond Limitations of Plant Functional Types When Predicting Global Ecosystem-Atmosphere Fluxes: Exploring the Merits of Traits-Based Approaches. *Global Ecology and Biogeography* 21: 625-636.
- Violle C, Choler P, Borge B, Garnier E, Amiaud B, Debarros G, Diquelou S, Gachet S, Jolivet C, Kattge J, Lavorel S, Lemauviel-Lavenant S, Loranger J, Mikolajczak A, Munoz F, Olivier J, Viovy N (2015) Vegetation Ecology Meets Ecosystem Science: Permanent Grasslands as a Functional Biogeography Case Study. *Science of the Total Environment* 534: 43-51.
- Violle C, Reich PB, Pacala SW, Enquist BJ, Kattge J (2014) The Emergence and Promise of Functional Biogeography. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 111: 13690-13696.
- Wang YP, Lu XJ, Wright IJ, Dai YJ, Rayner PJ, Reich PB (2012) Correlations among Leaf Traits Provide a Significant Constraint on the Estimate of Global Gross Primary Production. *Geophysical Research Letters* 39.
- Le continuum Homme-Terre-Mer**
- Ashley G.M. (1998). Where are we headed? "Soft" rock research into the new millennium. *Geological Society of America Abstract/Program*, vol. 30. p. A-148.
- Barles S. (2010). Society, Energy and Materials: What are the Contributions of Industrial Ecology, Territorial Ecology and Urban Metabolism to Sustainable Urban Development Issues? *Journal of Environmental Planning and Management*, 53(4): 439-455.
- Barles S. (2017). « Écologie territoriale et métabolisme urbain : quelques enjeux de la transition socio-écologique », *Revue d'économie régionale et urbaine*, 5: 819-836.
- Bertin, X., Li, K., Roland, A., Bidlot, J.R., (2015). The contribution of short-waves in storm surges: Two case studies in the Bay of Biscay, *Continental Shelf Research*, 96, 1-15.
- Billen, G., Garnier, J. (2007). River basin nutrient delivery to the coastal sea: assessing its potential to sustain new production of non-siliceous algae. *Mar. Chem*, 106: 148-160. doi: 10.1016/j.marchem.2006.12.017.
- Castelle, B., Guillot, B., Marieu, V., Chaumillon, E., Hanquiez, V., Bujan, S., Poppeschi, C. (2018a). Spatial and temporal patterns of shoreline change of a 280-km high-energy disrupted sandy coast from 1950 to 2014: SW France. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 200, 212-223.
- Castelle, B., Abadie, S., Bertin, X., Chaumillon, E., Le Cozannet, G., Long, N., Rocle, N., Sottolichio, A. (2018b). Modifications physiques du littoral. Dans « *Anticiper les Changements Climatique en Nouvelle-Aquitaine – Pour agir dans les territoires* » Ed. Région Nouvelle-Aquitaine (488 pages), pp. 302-329.
- Curie F., Ducharme A., Sebilou M., Bendjoudi H. (2008). Denitrification in a hyporheic riparian zone controlled by river regulation in the Seine river basin (France). *Hydrological processes*.
- Crutzen P.J., Stoermer E.F. (2000). The « anthropocene. » *Global Change Newsletter*. (41): 17–18. <http://bit.ly/1fMiD7b>
- Desmit X., Thieu V., Dulière V., Ménesguen A., Campuzano F., Lassaletta L., Sobrinho J.L., Silvestre M., Garnier J., Neves R., Billen G., Lacroix G. (2018). Reducing marine eutrophication may require a paradigmatic change. *Science of the Total Environment*, 635: 1444–1466. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.181.



- Garnier J., Ramarson A., Billen G., Théry S., Thiéry D., Thieu V., Minaudo C., Moatar F. (2018). Nutrient inputs and hydrology together determine biogeochemical status of the Loire River (France): current situation and possible future scenarios. *Science of the Total Environment*, 637–638: 609–624. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.045
- Garnier E., Ciavola P., Armaroli C., Spencer T. Ferreira O (2017). Historical analysis of storms events : case studies in France, England, Portugal and Italy, *Coastal Engineering*, http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.06.014.
- Garnier E. (2017). « Xynthia, February 2010 : Autopsy of a Forseeable Catastrophe », in Quevauviller P (eds.), *Coping with Coastal storms*, Chichester, John Wiley & Sons, pp. 111-148.
- Gu, S., Gruau, G., Dupas, R., Rumpel, C., Crème, A., Fovet, O., Gascuel-Oudou, C., Jeanneau, L., Humbert, G., Petitjean, P. (2017). Release of dissolved phosphorus from riparian wetlands: evidence for complex interactions among hydroclimate variability, topography and soil properties. *Sci. Total Environ.* 598, 421–431.
- Quevauviller P., Ciavola P., Garnier E. (eds.) (2017), *Management of the Effects of Coastal Storms: Policy, Scientific and Historical Perspectives*, Chichester, John Wiley & Sons, 188p.
- Pinay G., Gascuel C., Ménesguen A., Souchon A., Le Moal M. (coord), Levain A., Etrillard C., Moatar F., Pannard A., Souchu P.. *L'eutrophisation : manifestations, causes, conséquences et prédictibilité. Synthèse de l'Expertise scientifique collective CNRS - Ifremer - INRA - Irstea (France)*, 144 pages.
- Splinter, K.D., Turner, I.L., Davidson, D.A., Barnard, P., Castelle, B., Oltman-Shay, J. (2014). A generalized equilibrium model for predicting daily to inter-annual shoreline response, *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*, 119, 1936-1958, doi:10.1002/2014JF003106.
- van Maanen, B., Coco, G. & Bryan, K. R. (2015). On the ecogeomorphological feedbacks that control tidal channel network evolution in a sandy mangrove setting. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 471 (2180)
- Vannote RL, Minshall GW, Cummins KW, Sedell JR, Cushing CE. *The river continuum concept*. *Can J Aquat Sci* 1980;37:130–7.
- Vitousek, S., P. L. Barnard, P. Limber, L. Erikson, and B. Cole (2017), A model integrating longshore and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change, *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*, 122, 782–806
- Vollenweider, R. A. (1968), *Water management research. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication*, OECD. Paris. Tech. Rep. DA 5/SCI/68.27, 250 pp.
- Volta, C., G. G. Laruelle, S. Arndt, and P. Regnier (2016), *Linking biogeochemistry to hydrogeometrical variability in tidal estuaries: a generic modeling approach*, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20(3), 991–1030, doi:10.5194/hess-20-991-2016.

### Nouvelles méthodes et nouvelles techniques de développement instrumentales

- Aleklett K., Kiers E. T., Ohlsson P., Shimizu T. S., Caldas V. E. and Hammer E. C. (2018) Build your own soil: exploring microfluidics to create microbial habitat structures. *ISME J.* 12, 312–319.
- Jokerst J. C., Emory J. M. and Henry C. S. (2012) Advances in microfluidics for environmental analysis. *Analyst* 137, 24–34.
- Otten W., Pajor R., Schmidt S., Baveye P. C., Hague R. and Falconer R. E. (2012) Combining X-ray CT and 3D printing technology to produce microcosms with replicable, complex pore geometries. *Soil Biol. Biochem.* 51, 53–55.
- Pol R., Cespedes F., Gabriel D. and Baeza M. (2017) Microfluidic lab-on-a-chip platforms for environmental monitoring. *Trac-Trends Anal. Chem.* 95, 62–68.
- Prospectives de l'Institut d'écologie environnement CNRS, compte-rendu des journées des 22, 23 et 24 février 2017, Bordeaux*
- Son K., Brumley D. R. and Stocker R. (2015) Live from under the lens: exploring microbial motility with dynamic imaging and microfluidics. *Nat. Rev. Microbiol.* 13, 761–775.
- Stanley C. E., Grossmann G., Casadevall i Solvas X. and deMello A. J. (2016) *Soil-on-a-Chip: microfluidic platforms for environmental organismal studies* (vol 16 pg 228, 2016). *Lab. Chip* 16, 622–622.

## GLOSSAIRE

AnaEE	Analyses et Expérimentations pour les Écosystèmes
CNAP	Conseil National des Astronautes Physiciens
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CTOH	Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère
eLTER	<i>European network of Long-Term Ecosystem Research</i>
ECV	<i>Essential Climate Variable</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
GCOS	<i>Global Observing System for Climate</i>
GTOS	<i>Global Terrestrial Observing System</i>
HYBAM	Hydrologie et Biogéochimie du Bassin Amazonien (CNRS-INSU).
INSHS	Institut des Sciences Humaines et Sociales
ITA	Ingénieurs, Techniciens et Administratifs
ORE	Observatoire de Recherche en Environnement
OSR	Observatoire Spatiale Régional
OSU	Observatoire des Sciences de l'Univers
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PNTS	Programme National de Télédétection Spatiale
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SARAL	<i>Satellite with ARGOS and AltiKa</i>
SCOA	Surfaces Continentales - Océan - Atmosphère
SIC	Surface et Interface Continentale
SO	Systèmes d'Observation
SMOS	<i>Soil Moisture and Ocean Salinity</i>
SNO	Service National d'Observation
SOERE	Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement

**Coordination éditoriale**

Dominique Armand

**Impression**

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

**Conception / Maquette**

CBA Design / Page B

**Septembre 2019**

## INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS

Centre National de la Recherche Scientifique  
3, rue Michel-Ange 75016 Paris  
[www.insu.cnrs.fr](http://www.insu.cnrs.fr)

