



# PROSPECTIVE

SURFACES ET INTERFACES  
CONTINENTALES 2018-2022

RÉSUMÉS EXTRAITS DU DOCUMENT DE PROSPECTIVE

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

Édito	5
Introduction : Une prospective des sciences des Surfaces et Interfaces Continentales dans l'agenda post COP 21	6
Que reste-t-il de la prospective 2013-2017 ?	10
Comment innover aussi dans la communication de notre objet d'étude ?	11
De l'observation à la modélisation : approches intégrées	13
Cycles longs – Cycles courts	17
Liens biotique – abiotique	19
La matière organique dans tous ses états	21
Interface entre la basse atmosphère et les surfaces continentales	23
Le continuum Homme-Terre-Mer	25
Nouvelles méthodes et nouvelles techniques de développement instrumentales	27
Événements Extrêmes - Aléas et Risques	29
Ont contribué	32
Références et Glossaires	34

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.

Signataires :  
**CNRS-INSU**  
**CNRS-INEE**  
**IRD**  
**INRA**  
**IRSTEA**  
**IFREMER**  
**BRGM**  
**CNES**  
**CEA**  
**ANDRA**  
**IFSTTAR**  
**MÉTÉO-FRANCE**





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 (CC-NUCC), 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. A 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 verrous 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.



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

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 cet 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.

Des progrès importants ont été réalisés sur l'étude des transferts et des flux de matière dans la zone critique par le développement d'études multi-isotopiques, la combinaison d'un grand nombre de traceurs, et l'arrivée d'une imagerie des surfaces continentales à haute résolution.

La prise en compte du rôle des organismes sur les propriétés et le fonctionnement des écosystèmes, et sur le changement d'échelle, a été abordée par des outils de modélisation, d'observation et d'expérimentation (mésocosmes) notamment dans le cadre du changement global, mais c'est encore un challenge. Par exemple, il faudrait intégrer le lien entre activité biologique et dynamique de la MO dans le cycle du carbone. Le lien entre le fonctionnement des écosystèmes et le fonctionnement des sociétés humaines est aussi à développer.

Du côté de la dynamique des éléments et des contaminants, la physico-chimie des interfaces, la biogéochimie, et l'éco-toxicologie, des avancées technologiques sont soulignées, en termes de résolutions et de limites de détection/quantification. Mais des verrous scientifiques majeurs sont soulignés comme les couplages entre processus physiques, chimiques et biologiques dans un même compartiment et leurs conséquences en termes de flux et de bilans, la modélisation de processus aux méso-échelles, les contaminations multiples, la prise en compte de l'effet rétroactif du vivant sur ces processus, pour aller vers une écotoxicologie intégrative.

Dans le domaine des paléo-environnements, la création de rétro-observatoires au sein des observatoires SIC est à encourager, pour profiter des expériences passées sur du temps long. 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.

Sont abordés également les défis aux interfaces qui restent souvent des verrous. Ainsi, le milieu urbain, reste un objet d'étude à investir, pertinent face à l'urbanisation croissante. Le littoral, lieu d'interface terre/océan/atmosphère avec de très forts enjeux liés aux changements globaux d'origine anthropique fait ainsi l'objet d'un atelier de cette prospective, ainsi que les « hot spots/hot moments » de flux et de réactivité.

Un des faits marquants depuis la dernière prospective est la structuration des services d'observation qui a été menée et qui a permis la constitution de l'Infrastructure de Recherche OZCAR, ajoutée à la feuille de route française des IR en 2015. Elle répond au besoin de structuration et d'internationalisation de nos SNO, avec les Zones Ateliers, le miroir LTER français de l'infrastructure européenne en construction eLTER. 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.

La prospective 2017 pose aussi les bases d'une réflexion sur le devenir et les perspectives d'évolution d'EC2CO, l'action incitative créée il y a plus d'une dizaine d'années pour soutenir et fédérer la communauté SIC, en termes de contenu et d'organisation de l'appel à projets, et d'interaction avec d'autres programmes et avec les partenaires.

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

L'objet central de nos recherches est cette fine pellicule à la surface des continents qui enveloppe notre planète Terre, de la basse atmosphère 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 complexité, et le fait qu'elle conditionne largement la vie sur terre, font des enveloppes continentales une véritable Zone Critique. A l'ère de l'Anthropocène, 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.

Les notions mêmes de Zone Critique et d'Anthropocène interdisent de considérer les sociétés humaines dans toute leur complexité comme simplement extérieures à notre domaine scientifique. Il est donc impossible que les spécialistes que nous sommes utilisons le modèle traditionnel de relations entre science et société, modèle « 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 vitalement intéressées.

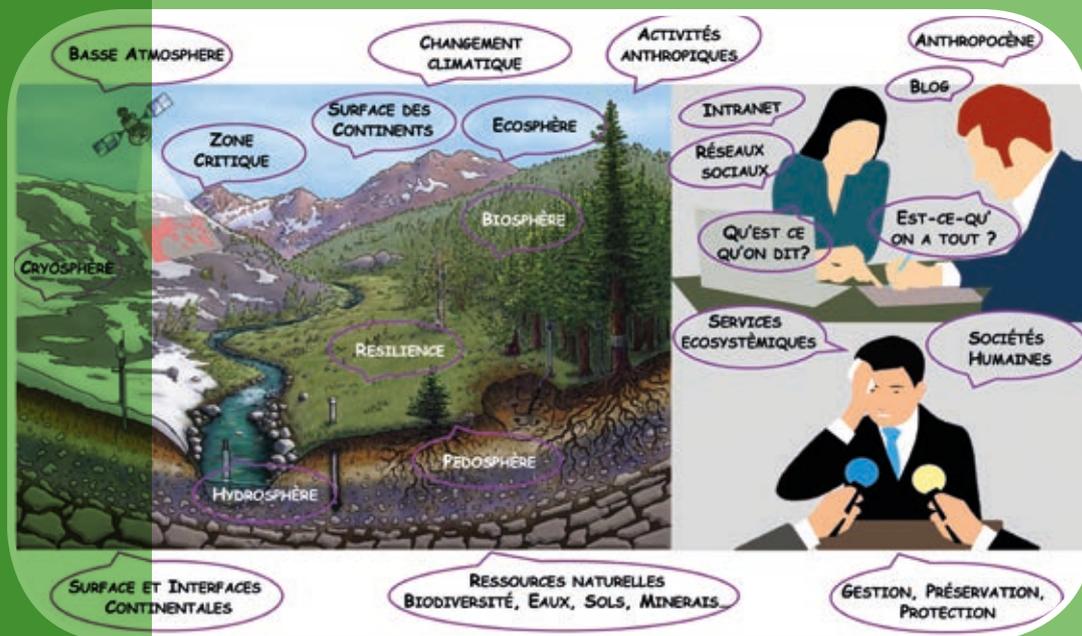
Un modèle différent du modèle « diffusionniste » n'existe pas tout fait sur étagère et il nous faut l'inventer ou, en tous cas, l'adapter à nos besoins. Cette partie de la prospective du domaine avait donc pour but d'esquisser en quoi notre communauté doit innover également dans son rapport avec la société, l'enseignement, le débat public et la politique scientifique.

## COMMENT NOMMER LE OU LES OBJETS DE NOS ÉTUDES ?

Notre domaine est défini par l'objet étudié, plus que par les disciplines scientifiques qui servent à l'étudier, à l'instar d'autres domaines (océans, atmosphère) des sciences de l'univers. 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), dénomination actuelle de notre domaine. Une réflexion a donc été engagée pour mieux le dénommer pour qu'il soit compréhensible par tous. Le terme « Interfaces » est mal perçu et incompréhensible au sein de la communauté SIC qui propose que l'on garde seulement « Surfaces Continentales » (SC) pour ne pas « brouiller le signal ». Elle pro-

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

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



pose aussi les dénominations « Environnements Continentaux » ou « Écosphère Continentale » (EC). Le terme « Zone Critique » généralement accepté par une grande partie de la communauté est assez énigmatique pour les extérieurs à la communauté et pour la société en général et le terme « critique » intrigue, voire inquiète.

## COMMENT COMMUNIQUER ENVERS LA SOCIÉTÉ ?

La communication doit être centrée d'une part, sur les milieux que nous étudions comme l'eau, les sols, les écosystèmes et les services rendus par tous ces milieux et d'autre 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 est difficile de 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 son rôle dans les processus anthropiques et naturels mis en cause. Enfin, il est important de définir la cible de notre communication car on ne peut pas communiquer vers « le grand public » en général. Il faut donc l'adapter à la population à laquelle elle s'adresse si l'on veut qu'elle soit efficace, voire percutante. Il en est de même 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 vers la société est un métier à temps plein et de nombreux laboratoires qui ont du mal à communiquer. Très peu 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 (INSU et INEE pour le 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 leurs résultats. On peut imaginer la création de Cellules de Communication dont les missions seraient au-delà de la promotion des organismes/instituts, d'intégrer aussi la communication sur les projets scientifiques et sur les résultats obtenus.

Un des moyens pour les laboratoires de mieux communiquer serait de 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. On peut alors envisager une communication conjointe scientifiques/partenaires sur ces projets/résultats.

Nos objets d'études se prêtent aussi à la science participative, excellent moyen de communication avec lequel les professionnels et les acteurs des territoires peuvent 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 sur le visuel. L'impact sur ces réseaux nécessite une présence quasi-permanente dans la « blogosphère » et donc du personnel dédié.

Notre communication doit être « positive » et faire « rêver » la société, même si l'on parle de questions fondamentales. Les Instituts concernés par notre domaine doivent lui donner plus de place dans leur communication. Nous devons faire un effort pour développer et améliorer la capacité des scientifiques à communiquer envers la société, en utilisant par exemple le « media training » comme 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 (crues par exemple), pour lesquels les médias demandent une caractérisation des phénomènes (causes, mesure du caractère exceptionnel, lien avec le changement climatique ou d'autres causes). Il s'agit alors d'une occasion de parler de nos recherches mais 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 par exemple), 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.

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

ODD 4 - 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. ODD 17- 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.

# DE L'OBSERVATION À LA MODÉLISATION : APPROCHES INTÉGRÉES

## APPROCHE INTÉGRÉE : OBSERVATIONS/ EXPÉRIMENTATIONS *IN SITU*, TÉLÉDÉTECTION, MODÉLISATION

### Contexte scientifique, technique et sociétal, les enjeux

Face aux défis posés par les changements globaux, l'approche intégrée en s'appuyant sur la combinaison de données et d'expérimentations *in situ*, de données satellitaires et de modélisation, vise à améliorer notre compréhension du fonctionnement de la zone critique, à prévoir ses évolutions possibles pour fournir des éléments pour l'aide à la décision. En proposant de relier les différents compartiments de la zone critique, d'analyser les interactions et rétroactions entre processus d'origine biotique et abiotique, et en prenant en compte les actions des sociétés sur leur milieu et lorsque nécessaire les boucles de rétroactions susceptibles de modifier considérablement le fonctionnement de la zone critique, elle permettra l'analyse des interactions entre ODDs et fournira des guides pour les atteindre. 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.

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

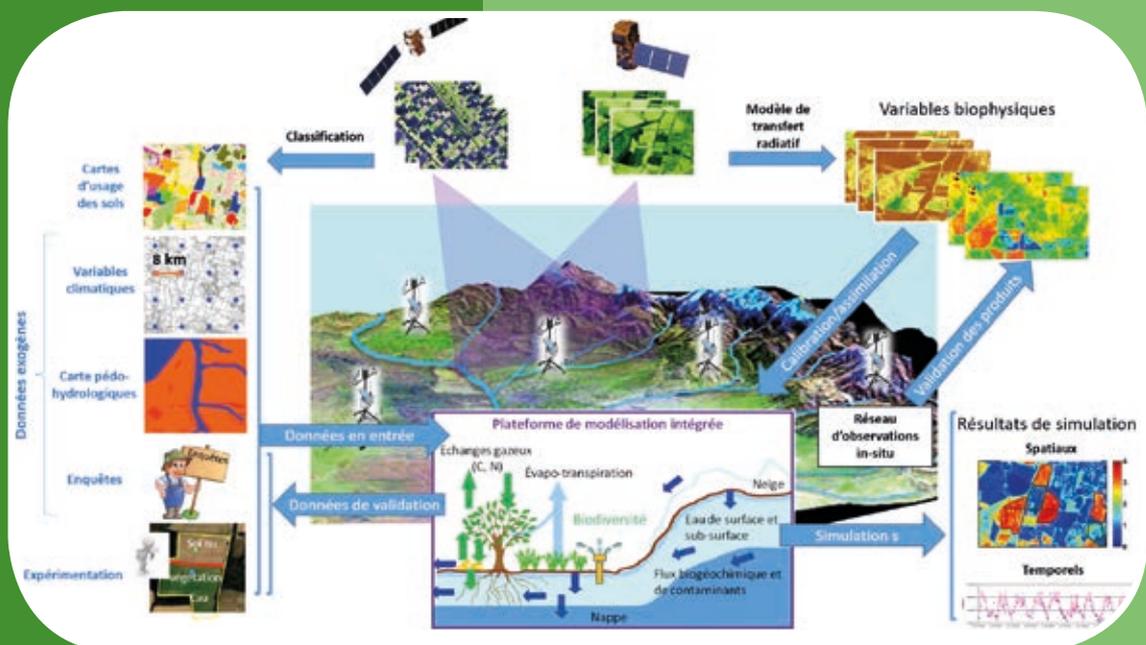
Plusieurs travaux peuvent contribuer à l'approche intégrée mais à ce jour, ils sont restés encore trop compartimentés. Par ailleurs le contexte a changé avec l'émergence des missions spatiales haute résolution (HR) à couverture globale et l'évolution des SNO ce qui pose de réels défis à notre communauté pour analyser un grand volume d'information. De notre capacité à optimiser les synergies entre les différentes sources d'information observées et/ou simulées, dépendra notre capacité à évaluer/réduire les incertitudes et donc à fournir des éléments pour la prévision et la gestion de l'environnement.

Au-delà du renforcement de nos connaissances, et en particulier en rendant compte de la complexité des interactions entre compartiments et de leur évolution spatiotemporelle, plusieurs verrous se posent de manière récurrente :

- **Difficulté d'accès à des données systématiques** sur les caractéristiques du milieu (topographie, sol, qualité de l'eau dans tous les compartiments), du vivant (biodiversité des écosystèmes) et des facteurs humains (culturels, normatifs, etc.);
- **Le manque de profondeur temporelle des données**, nécessaire pour par exemple déconvoluer les impacts climatiques des impacts anthropiques : en particulier, la télédétection haute résolution (HR) qui nécessite de développer des méthodologies permettant d'intégrer les données récentes aux données plus anciennes pour maintenir des observations comparables sur le long-terme;
- Notre **capacité à optimiser l'exploration et l'exploitation**

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

© Frédérique Plas/CNRS Photothèque



des informations contenues dans les données qu'elles soient *in situ* ou satellitaires qui nécessite le développement de procédés de validations croisées, éventuellement en recourant à la modélisation, et notre capacité à **stocker et analyser un grand volume de données** (en particulier issues des missions spatiales HR) qui exigent de nouvelles méthodes d'analyse et le renforcement des capacités de calcul des unités;

- Une **structuration insuffisante de la communauté autour de l'approche intégrée**.

### **Priorités pour les années à venir et implications en termes de moyens**

#### **Priorités scientifiques**

- **Continuer à faire évoluer nos observatoires/stratégies d'observation de manière à mieux répondre aux questions posées** et 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. Il s'agira ici de renforcer l'interopérabilité des données;
- **L'interdisciplinarité, voire la transdisciplinarité, est au cœur de l'approche intégrée. Repenser la modélisation comme un outil intégrateur de connaissance et comme un exercice collaboratif** associant la communauté SHS mais également d'autres communautés comme les informaticiens, les mathématiciens qui permettront de tester de nouvelles formulations et méthodes d'analyse (cloud computing, data mining, intelligence artificielle...);
- **Renforcer le développement des techniques d'assimilation multi-variables ou multi-capteurs** pour exploiter au maximum de leur potentiel les mesures *in situ* et de télé-détection.

#### **Priorités organisationnelles**

- **Instaurer un lieu (colloque) et créer une plateforme d'échange inter-instituts et inter-institutions autour des méthodologies, modèles et données mobilisées autour de l'approche intégrée pour développer une communauté ouverte sur les autres** (SHS, informatique, mathématique), **structurée et visible à l'international**;
- **THEIA**, le pôle de données et de services surfaces continentales et l'infrastructure **Système Terre** peuvent jouer un rôle essentiel pour alimenter l'approche intégrée. Cependant, des moyens importants devront être consacrés pour passer à des produits pré-opérationnels et à des produits à destination d'utilisateurs finaux (parfois peu expérimentés). Il faudra donc veiller à ce que le dimensionnement des moyens alloués réponde aux objectifs de la communauté SIC;
- **Relation avec les ODD et les porteurs d'enjeux.**

L'approche intégrée est particulièrement bien adaptée pour renseigner les interactions entre les ODDs, par exemple 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).

## **STRATÉGIE D'OBSERVATION À LONG TERME**

### **Problématique générale**

Comprendre les mécanismes fondamentaux du fonctionnement du système Terre et prévoir ses évolutions possibles à différentes échelles de temps demeurent une préoccupation majeure de la communauté scientifique et des concitoyens. Les impacts des changements globaux sur l'environnement, la biodiversité, la santé et la réponse de la société, ne pourront être mis en évidence et compris que si la communauté scientifique s'engage sur une démarche d'observation sur le long-terme des processus biotiques et abiotiques. Cette démarche, qui repose sur l'acquisition de données à haute fréquence ou une stratégie d'échantillonnage qui permette l'identification des phénomènes émergents, doit pouvoir rendre compte de l'évolution des socio-écosystèmes à différentes échelles spatio-temporelles face aux forçages bio-climatiques. L'acquisition de chronique de données fiables et adaptées, la bancarisation des échantillons doivent permettre des analyses rétrospectives et le développement de modèles.

Pour ce faire de nombreux dispositifs d'observation instrumentés, multi-disciplinaires, multi-paramètres et multi-partenaires existent sur le territoire national mais également à l'international. Ils sont le plus souvent labellisés par les instituts (SNO, ZA) et ont été récemment structurés en Infrastructure de Recherche (IR: OZCAR, ANAEE-France, ILICO). Ils permettent un suivi fin des transferts d'eau et de matière au sein et en limite des systèmes continentaux, un suivi de la dynamique des écosystèmes en réponse aux forçages climatiques et anthropiques, et un suivi des évolutions géomorphologique, sédimentaire et hydrodynamique des zones littorales.

### **Enjeux**

Il convient cependant d'optimiser ces dispositifs d'observation, d'en améliorer leurs lisibilités et d'œuvrer à leur intégration dans des structures européennes voire internationales afin d'en assurer leur pérennité. Cette prospective a identifié la nécessité de parfaire et compléter ces suivis sur des zones climatiques, des milieux et/ou des compartiments mal ou peu connus et présentant de forts enjeux sociétaux et de développement durable. Ceci concerne notamment la zone tropicale, le milieu urbain, et des compartiments comme le régolithe et la cryosphère. Par ailleurs dans un contexte de changement global (changement climatique et augmentation de la démographie humaine et animale) les problématiques liant Environnement – Santé sont identifiées comme des défis majeurs. Elles se doivent d'être abordées selon des démarches intégratives multidisciplinaires et pour cela s'appuyer sur ces dispositifs d'observation. Aujourd'hui, 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.

## Défis logistiques et techniques

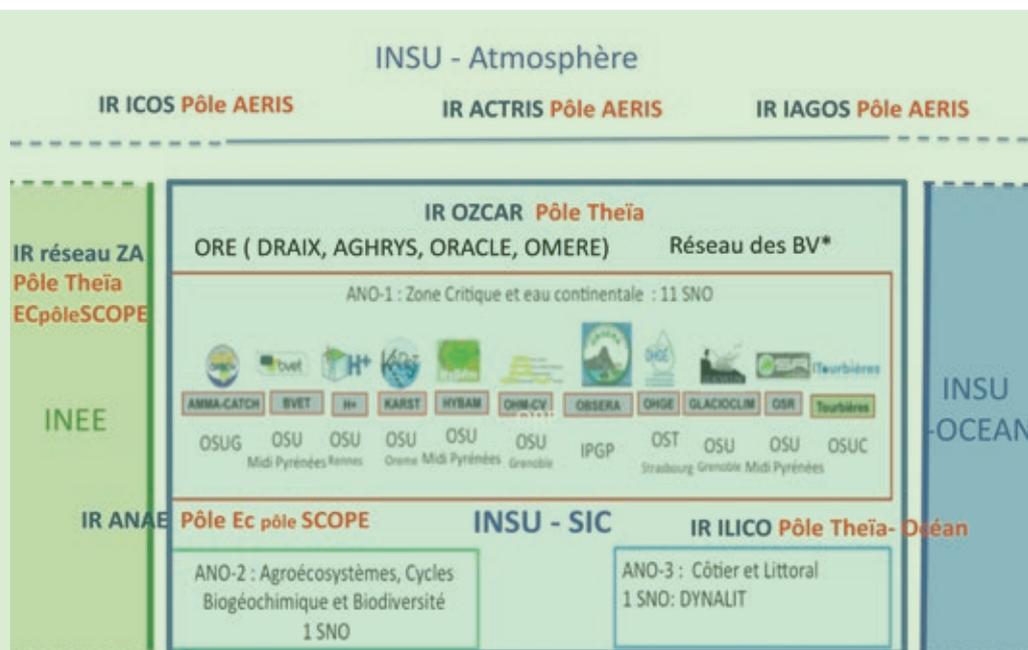
Dans un contexte de labellisation nationale et européenne des systèmes d'observations, un des défis majeurs sera de développer une démarche qualité certifiant la fiabilité des mesures *in situ* et en continu, la traçabilité des échantillons physiques et biologiques ainsi que la bancarisation et la diffusion de ces échantillons et des données numériques. Cette démarche doit être coordonnée 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. Les banques géo-référencées d'échantillons, tout comme les bases de données numériques doivent constituer un patrimoine scientifique partagé, et permettre des analyses rétrospectives à une échelle de temps qui dépasse celle de la carrière des chercheurs. Cette démarche concertée de bancarisation nécessitera dans un premier temps d'identifier l'existant, de recenser voir de référencer les projets potentiels ou en cours et d'organiser les modalités de stockage. Ce dernier point est capital face à l'émergence des jeux de données numériques occupant un grand volume (« Big data ») et aux interrogations qui se font jour sur le type de support physique qui permettra d'assurer un support pérenne des observations et sur le type d'informations à sauvegarder (données brutes versus produits de niveau supérieur de plus faible volume mais conduisant à la perte de certaines informations).

Au cours de ces dernières années, l'utilisation des observations de télédétection spatiale, pour la caractérisation des surfaces et interfaces continentales, s'est généralisée grâce aux progrès techniques qui ont contribué à l'amélioration de la qualité des observations et de leur résolution spatiale,

à l'émergence de capteurs à moyenne et haute-résolution spatiales, à une meilleure adéquation entre les produits fournis à la communauté scientifique, et à la création de services de distribution de données par les agences spatiales et par le pôle thématique inter-organisme Theia. Les défis seront d'assurer la continuité de ces observations, d'accroître l'implication des scientifiques dans la définition des missions spatiales et de poursuivre le développement de capteurs visant à parfaire la représentativité des mesures et leur adéquation aux processus à quantifier. Aujourd'hui, il faut favoriser les synergies entre observatoires et pôle de données et ainsi faciliter 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).

## Quel avenir pour les systèmes d'observations ?

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. Ces 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 à relever l'ensemble des défis lié à l'observation à long terme. Face à ce constat du déficit récurrent de moyens humains, mais également de l'équipement et des moyens de fonctionnement de ces SNO, il est souhaitable de renforcer des politiques concertées entre les universités et le CNRS (notam-



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

## Structuration des systèmes d'observation

ment 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.

## MODÉLISATION

L'un des enjeux de la modélisation est 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 (ODD). Les ressources en eau, comme les ressources en sol sont soumises à de fortes pressions et susceptibles d'impacter 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, et l'impact des changements climatiques. 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. 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.

Les gammes d'échelles spatiales et temporelles pour les SIC couvrent ~ 15 ordres de grandeur. Aux échelles moléculaires, la modélisation vise la compréhension et 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 d'autre part. Un enjeu essentiel 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 et en tester la versatilité. 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 des ODD. 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. 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 (103 à 106 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 et pertinentes pour les ODD.

La modélisation des SIC est entrée dans l'ère de la « science intensive de la donnée » ou la production des données dépasse nos capacités à les analyser sans outils numériques adaptés, sans modèle permettant de les assimiler. Cette

défi nécessite ainsi une collaboration étroite entre modélisateurs et observateurs. Dans ce sens, l'infrastructure de recherche OZCAR n'est pas le lieu que de l'observation, mais ambitionne aussi de renforcer la synergie Observation - Modélisation en permettant intercomparaison de modèles, archivage des résultats de simulations de référence, susciter le développement d'outils de couplage, d'assimilation, et de fouille de données. Ainsi, des systèmes d'assimilation de données adaptés aux surfaces continentales devront être développés pour servir d'outils d'aide à la décision dans des applications liées aux ODD telles que le suivi des sécheresses édaphiques et agricoles.

### 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. 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. 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, au service des ODD. 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.

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.

# CYCLES LONGS – CYCLES COURTS

## PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

Pouvoir prédire l'évolution des Surfaces et Interfaces Continentales (SICs) et de la Zone Critique (ZC) et leurs ressources (eau, biodiversité, sols, énergétiques...) à l'horizon de la fin du XXI<sup>e</sup> siècle et au-delà est un véritable enjeu sociétal, et un immense challenge scientifique. A 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 extrêmes instantanés (crues, pollutions flash, vagues de chaleur, séismes...) jusqu'aux dynamiques lentes de transformation du paysage et de la biodiversité par l'érosion, l'évolution biologique, la tectonique, le climat ou les réactions biogéochimiques au cœur des cycles des éléments. Au-delà de ce premier enjeu, il est nécessaire de mieux comprendre comment les processus géologiques, climatiques et biologiques long-terme pré-conditionnent la dynamique actuelle de la ZC. A l'inverse, le transfert d'échelle permet-

tant d'injecter la compréhension des processus et forçages courts dans la dynamique long-terme de la ZC reste trop peu abordé, alors même qu'il offre la possibilité de croiser les approches de différentes communautés scientifiques sur un même objet. Dans ce contexte, la compréhension du rôle du vivant sur la dynamique long-terme de la zone critique est un enjeu scientifique majeur.

## IMPORTANCE POUR LES COMMUNAUTÉS SIC/TS/OA

Comprendre la réponse de la zone critique aux forçages anthropiques, biologiques, climatiques et tectoniques est un défi scientifique majeur qui nécessite davantage d'interactions entre les communautés SIC, TS et OA. Chacune de ces communautés a développé une forte expertise au sein de son domaine d'intérêt, mais la compréhension des dynamiques couplées à différentes échelles de temps nécessite un profond effort de décloisonnement.

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.

## VERROUS EXISTANTS

Au premier plan se trouve le problème des interactions et couplages entre échelles de temps court et long et leur articulation aux méso-échelles, ce qui nécessite le développement de méthodes et approches nouvelles pour mieux quantifier l'état dynamique des SICs et de la ZC dans des contextes naturels et anthropisés, avec là encore le besoin d'amplifier et de développer les collaborations entre les différentes communautés. Les conséquences des événements extrêmes sur les cycles biologiques et le rôle du vivant sur la dynamique long terme des SICs et de la ZC, sont deux autres questions majeures. Le développement de nouveaux marqueurs et la calibration de modèles d'inversion des enregistrements (sédimentaires, hydrologiques et biologiques) doivent contribuer à mieux caractériser la dynamique des systèmes naturels et anthropisés et leur réponse (effet bascule, résilience) aux événements extrêmes.

Dans de nombreuses situations, la complexité de la dynamique des éco-géosystèmes est liée au caractère transitoire des couplages et des réponses de ces systèmes aux forçages (ex : climatiques, anthropiques). De nouvelles études associant les différentes communautés (SIC, TS et OA) sont nécessaires pour caractériser, quantifier et modéliser les impacts environnementaux de différentes "bombes" à retardement, comme la fonte de la cryosphère, les pollutions métalliques dans les sols et leur relargage vers les milieux aquatiques, le stockage des déchets, etc.

La capacité de notre communauté à aborder ces grandes questions est conditionnée par un certain nombre de verrous technologiques. En particulier, l'étude et la mesure suivie des événements extrêmes sont difficiles, nécessitant de développer des instruments adaptés et les solutions de pérennisation des systèmes de mesures sur les sites pour capturer l'événement lorsqu'il a lieu. De plus, la caractérisation plus fine de l'état passé des SICs et de la ZC implique le développement d'outils haute résolution en géochimie et géochronologie, géophysique, géomatique et télédétection. Enfin, il existe un fort déficit de modèles numériques spatialisés incluant une large gamme de processus hydrologiques, géologiques et biologiques adaptés à l'étude de la dynamique de la zone critique aux échelles séculaires à millénaires.

## PRIORITÉS/DIRECTIONS

Le décloisonnement des disciplines doit être favorisé en créant des programmes de recherche INSU-INEE Trans-TS/OA/SIC, permettant plus d'interactions par exemple entre les géosciences et la biologie. De même, des jeunes chercheurs et ITAs doivent être recrutés aux interfaces disciplinaires (bio-géosciences, bio-géomorphologie...), et les mobilités thématiques des chercheurs encouragées et favorisées.

Le développement et le couplage de nouveaux outils géochimiques/géochronologiques, géophysiques et géomatiques haute résolution doivent être encouragés et les systèmes interopérables de partage et dissémination des données acquises largement développés. Un effort doit aussi être fait pour faciliter l'émergence de modèles numériques de prédiction des dynamiques et trajectoires de la ZC en réponse aux forçages anthropiques et climatiques, en particulier aux méso-échelles.

Le rôle des systèmes d'observations 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.

# LIENS BIOTIQUE - ABIOTIQUE

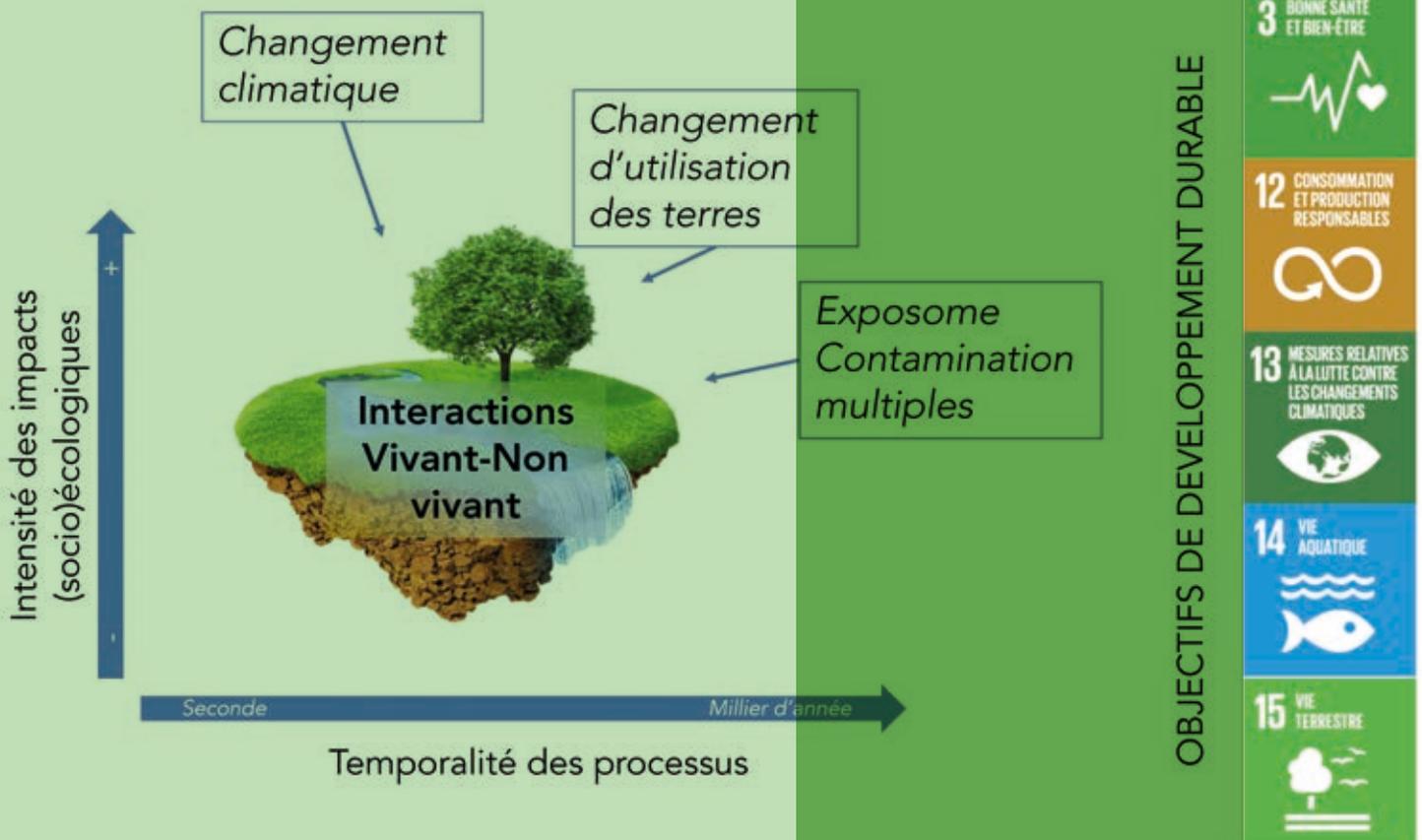
Les Surfaces et Interfaces Continentales constituent des zones de couplages entre le milieu physicochimique (abiotique) et le vivant (biotique). Cet atelier de la prospective a identifié trois enjeux majeurs pour lesquelles les processus couplés vivants/non-vivants mériteraient d'être mieux observés, 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

Les grands enjeux identifiés lors de l'atelier traitant des interactions Biotique-Abiotique en lien avec quatre objectifs de Développement Durable



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.

## IMPLICATIONS PROGRAMMATIQUES ET INSTITUTIONNELLE

### En terme de chantiers et moyens d'observation

- Faire converger les projets d'observations relevant des sciences de la biodiversité et ceux relevant des géosciences sur **des sites ateliers communs**.
- Rechercher de manière plus systématique les **complémentarités entre approches par observations, expérimentations et enquêtes**.

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

- Faire **des OSU les lieux privilégiés de la recherche en sciences de la zone critique**.
- 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.

### En terme de développement de compétences

- Définir et soutenir des tâches d'observations de l'ensemble des compartiments constitutifs des socio-écosystèmes (notamment pour le suivi de la biodiversité et 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 en coupant électrochimie, isotopie et spéciation.

# LA MATIÈRE ORGANIQUE DANS TOUS SES ÉTATS

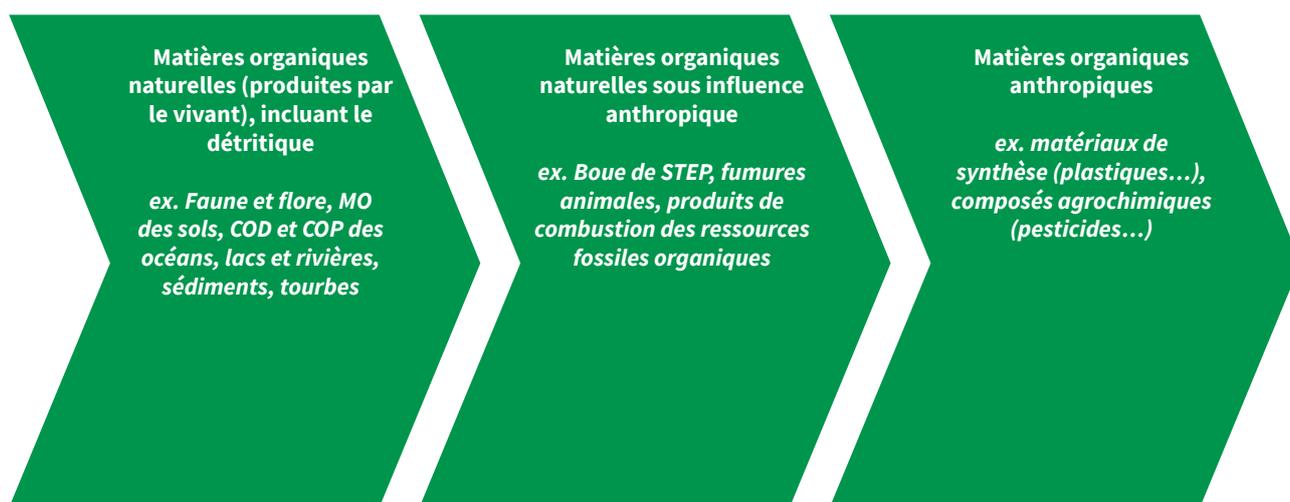
## CONTEXTE SCIENTIFIQUE, TECHNIQUE ET SOCIÉTAL, LES ENJEUX

Les matières organiques (MO) (définies comme des molécules formées très majoritairement de carbone (C) et d'hydrogène (H) et pouvant contenir des hétéroatomes tels que O, N, P et S) sont constituées de molécules d'une immense diversité, d'origines variées et se retrouvant dans tous les compartiments des surfaces continentales. 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 défi, un terreau fertile à l'interdisciplinarité. Les enjeux et questions scientifiques associés aux matières organiques couvrant des champs de réflexion très vastes, les présenter de manière exhaustive dans le cadre de cette Prospective aurait été irréaliste. De ce fait, les réflexions menées se sont concentrées sur les trois champs de recherche suivants: (1) matières organiques et climat; (2) matières organiques et qualité des sols; (3) matières organiques et pollutions.

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

Les MO sont étudiées par une communauté scientifique pluridisciplinaire issue de divers instituts. L'utilisation d'outils géochimiques variés (analyses spectroscopiques, moléculaires, isotopiques, etc.) et dont la résolution ne cesse de s'améliorer permet une caractérisation de plus en plus fine des MO et de leur dynamique dans l'environnement. Le développement des techniques «-omiques» a également permis de progresser sur la compréhension de la dégradation des MO par les micro-organismes. Les approches de modélisation, de plus en plus utilisées, ou de télédétection sont particulièrement prometteuses pour relier l'échelle des processus (souvent de l'ordre du nanomètre) à celles de la parcelle, du paysage ou même du globe.

En dépit d'avancées récentes, la communauté intéressée par les MO fait face à de nombreux verrous scientifiques, techniques voire organisationnels. 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. Les modèles de dynamique du C dans les sols opérant de l'échelle de la parcelle à l'échelle globale sont sub-optimaux. En effet, ils intègrent assez peu les connaissances sur les mécanismes de stabilisation et leur initialisation demeure très problématique. Certains milieux restent relativement peu étudiés. Un plus grand nombre de travaux sur les milieux tropicaux, urbains ou sur



### Diversité d'origine des matières organiques

les milieux froids serait ainsi nécessaire pour identifier les phénomènes génériques ou au contraire spécifiques aux différents milieux. Bien que la MO naturelle soit produite par les organismes vivants et serve de substrat à de nombreux organismes, l'interdisciplinarité géosciences-écolo-

gie reste assez peu développée, les travaux récents sur les relations entre biodiversité et devenir de la MO terrestre et aquatique constituant une exception. Un modèle biogéochimique multi-échelle du devenir des polluants (biogéochimie et transfert) représentant notamment le rôle du vivant et les interactions polluants/MO reste encore à réaliser. Les potentialités des outils de télédétection, également en plein essor, mériteraient d'être plus explorées. Enfin, il est dommage que les nombreux résultats de caractérisation de la MO ne soient pas intégrés dans une base de données, ce qui faciliterait les travaux portant sur l'utilisation de plusieurs sites.

### PRIORITÉS POUR LES ANNÉES À VENIR

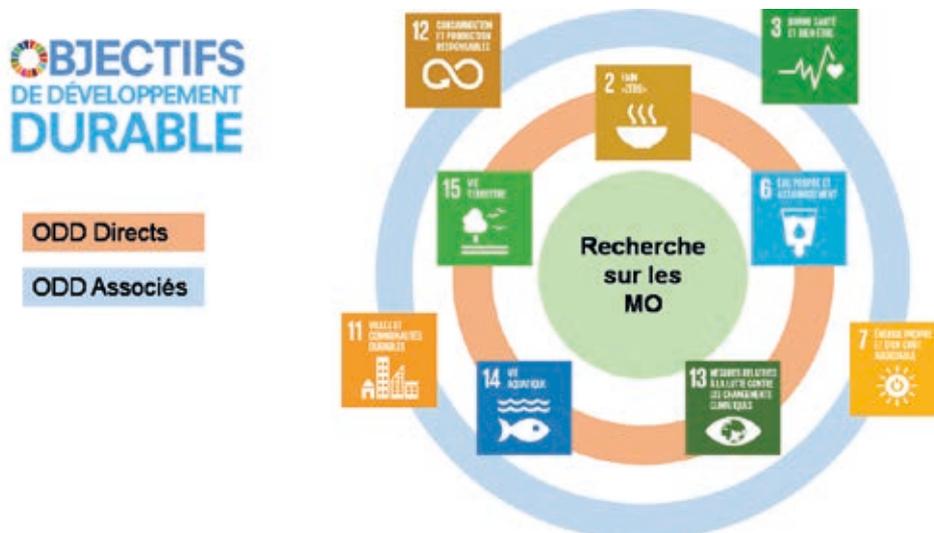
La progression de la recherche française sur la MO dans les prochaines années sera nécessairement en partie conditionnée par les moyens qui seront alloués et mis en œuvre. En premier lieu, la vitalité, la compétence et l'enthousiasme de la communauté ne pourront pas perdurer si les jeunes générations talentueuses ne peuvent bénéficier de recrutements sur des postes permanents d'(enseignant)chercheurs, ingénieurs et techniciens. De même, le remplacement et l'amélioration d'un parc analytique parfois vieillissant restent une priorité. Outre les développements propres aux différents champs disciplinaires, la progression de la recherche française sur les MO dépendra de la capacité de la communauté à utiliser les avancées de champs disciplinaires en plein essor comme la génomique environnementale ou la télédétection et à profiter des opportunités fournies par les différents chantiers et moyens d'observation maintenus par les différents instituts. Une structuration encore plus aboutie, par exemple *via* la constitution d'un Groupement De

Recherche (GDR) «matières organiques», pourrait être précieuse pour optimiser l'utilisation des moyens analytiques et orienter les travaux vers les sites les plus pertinents. Cette structure aurait également pour objectif d'amplifier les collaborations entre écologues et géochimistes, en espérant qu'elle puisse aussi faciliter les interactions avec la communauté SHS qui sont pour l'instant réduites.

### RELATION AVEC LES ODD ET LES PORTEURS D'ENJEUX

La recherche sur les MO peut contribuer à la réalisation directe 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»), elle contribue également de façon indirecte à la réalisation de plusieurs autres ODD (ODD 3 «Santé», ODD 7 «Énergies renouvelables», ODD 11 «Villes et communautés durables» et ODD 12 «Consommation responsable»). À ce titre, la communauté scientifique pourrait mieux profiter des fonds «Belmont Forum» ou «H2020». Les applications immédiates et concrètes que peuvent avoir les recherches sur les MO doit conduire à une meilleure interaction avec les porteurs d'enjeux et à la participation à des projets interdisciplinaires possédant une composante sociologique, anthropologique, politique ou économique. Pour les mêmes raisons, l'émergence des sciences participatives constitue une opportunité à saisir pour la communauté. Il y aurait sans doute des possibilités pour co-construire, avec différents acteurs, des études sur le lien entre MO et qualité des sols ou MO et devenir des polluants. Un accompagnement et des outils pour aider la communauté sont sans doute nécessaires pour optimiser ces interactions avec les différents porteurs d'enjeux.

Relation entre recherche sur les Matières Organiques et Objectifs de Développement Durable.



# INTERFACE ENTRE LA BASSE ATMOSPHÈRE ET LES SURFACES CONTINENTALES

L'interface entre l'atmosphère et les surfaces continentales est un lieu d'échanges importants d'énergie et de matière. Comprendre ce qui contrôle les flux échangés nécessite d'identifier puis de quantifier, aux échelles de temps et d'espace adéquates, les processus opérant dans le continuum sol-eau-plante-atmosphère. De façon générale, les questions d'intérêt concernent l'évaluation des rôles respectifs du changement climatique et de l'usage des sols sur les modifications des flux entrants et sortants d'énergie, d'eau et d'espèces-traces gazeuses, dissoutes ou particulaires. Plus précisément, nous avons identifié comme devant faire l'objet d'actions prioritaires dans les prochaines années les thèmes suivants :

## LES BILANS D'AZOTE ET DE CARBONE

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, notamment de  $N_2O$ , un puissant gaz à effet de serre et, pour une plus petite fraction d'oxydes d'azote ( $NO_x = NO + NO_2$ ). Les émissions « naturelles » (depuis les sols ou les zones humides) de  $NO_x$  sont environ dix fois supérieures à celles résultant des activités humaines (chauffage, transport...). Outre les sols, les zones humides naturelles ou artificielles, contribuent aussi à ces émissions et ce dans un contexte de changement global où leur extension et leur occurrence devraient évoluer rapidement. Les **bio-aérosols**, de par leurs impacts sur la santé, la chimie atmosphérique et les écosystèmes, constituent également un sujet d'intérêt pour les prochaines années.

Évaluer la capacité 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. L'observation depuis l'espace de la fluorescence naturelle de la végétation et celle, depuis le sol et l'espace, des variations saisonnières d'un homologue soufré du  $CO_2$ , l'oxysulfure de carbone (OCS), offre de nouvelles perspectives pour mieux contraindre à grande échelle l'activité photosynthétique des plantes. Par ailleurs, les émissions de composés organiques volatils (COV) par les plantes vas-

culaires représentent 80 % des émissions globales de COV dans l'atmosphère. Ces composés, très réactifs, contribuent très fortement, en relation avec les oxydes d'azote, à la formation d'ozone et 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

L'érosion éolienne des sols est responsable de la majeure partie des particules injectées dans l'atmosphère, soit 1,5 milliards de tonnes par an.

Cette érosion a, dans les régions-sources, des conséquences significatives sur la qualité de la couche superficielle des sols. Par ailleurs, les poussières émises ont des impacts très importants sur le climat et le fonctionnement de certains écosystèmes terrestres ou océaniques. Les émissions de poussières depuis les zones arides et semi-arides devraient significativement évoluer dans le futur puisqu'elles dépendent fortement de la vitesse du vent, des précipitations et de la couverture de la surface, autant de paramètres liés au climat. Des travaux récents suggèrent que les modifications de 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 aérosols. Les **surfaces continentales sont aussi une source anthropique indirecte de polluants atmosphériques** (fongicides, herbicides, insecticides, fertilisants...) dont les émissions et les impacts méritent d'être bien mieux documentés.

## LES MILIEUX COMPLEXES

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 bien connu d'îlot de chaleur, dû à différents facteurs physiques 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. À ces modifications liées à la nature des surfaces s'ajoutent les émissions anthropiques directes vers l'atmosphère de chaleur, d'humidité et de polluants. Les mécanismes de transfert à l'origine des flux de chaleur et de polluants urbains entre l'atmosphère, la surface et le 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 et son fonctionnement est à ce jour encore mal appréhendé. Comprendre le rôle respectif des éléments qui constituent le milieu urbain sur les échanges d'énergie et de polluants, ainsi que leur impact sur l'environnement nécessite donc d'aborder le problème sous un aspect multi-échelles et multiprocessus intégrant les différents compartiments de la zone critique.

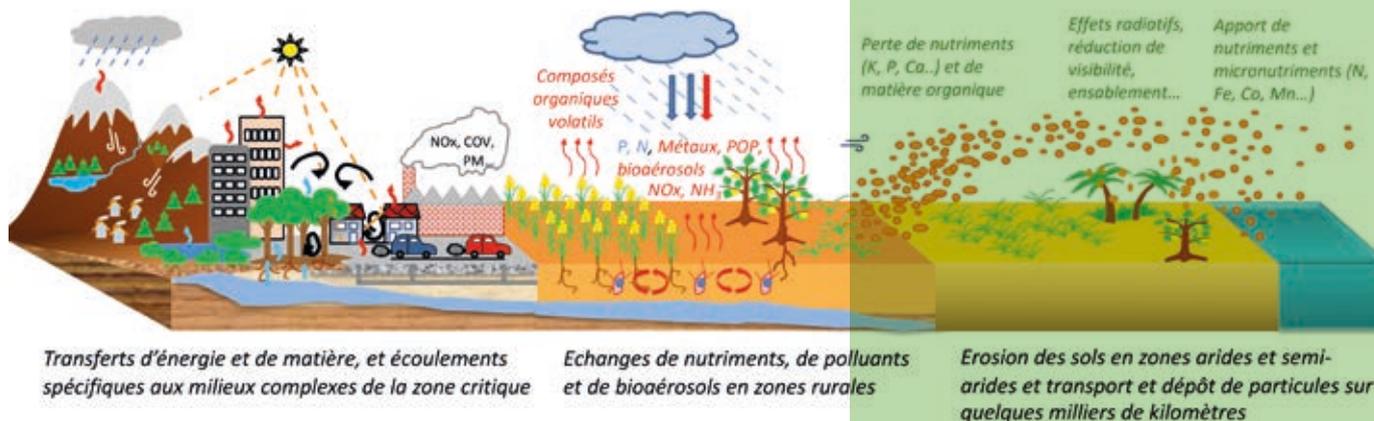
Ces questions et enjeux sont très similaires à ceux que soulèvent les **milieux de montagne**, où l'on retrouve des découplages entre la couche limite atmosphérique et la configuration 3D des vallées, et des dynamiques locales spécifiques conduisant à des problématiques de santé, de ressources

en eau, de risques et d'évolution de la biodiversité. Ces milieux sont aussi susceptibles de subir dans le futur des transferts de contaminations « dormantes » enregistrées par le passé suite à des pressions anthropiques.

En hiver, aux latitudes boréales, jusqu'à 25 % des terres émergées de l'hémisphère nord sont affectées par la présence de neige et, 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, avec une caractéristique majeure liée à sa très forte réflectivité du rayonnement solaire incident. 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. 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. Parmi les points nécessitant une attention particulière, on mentionnera l'étude des couches limites 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. 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

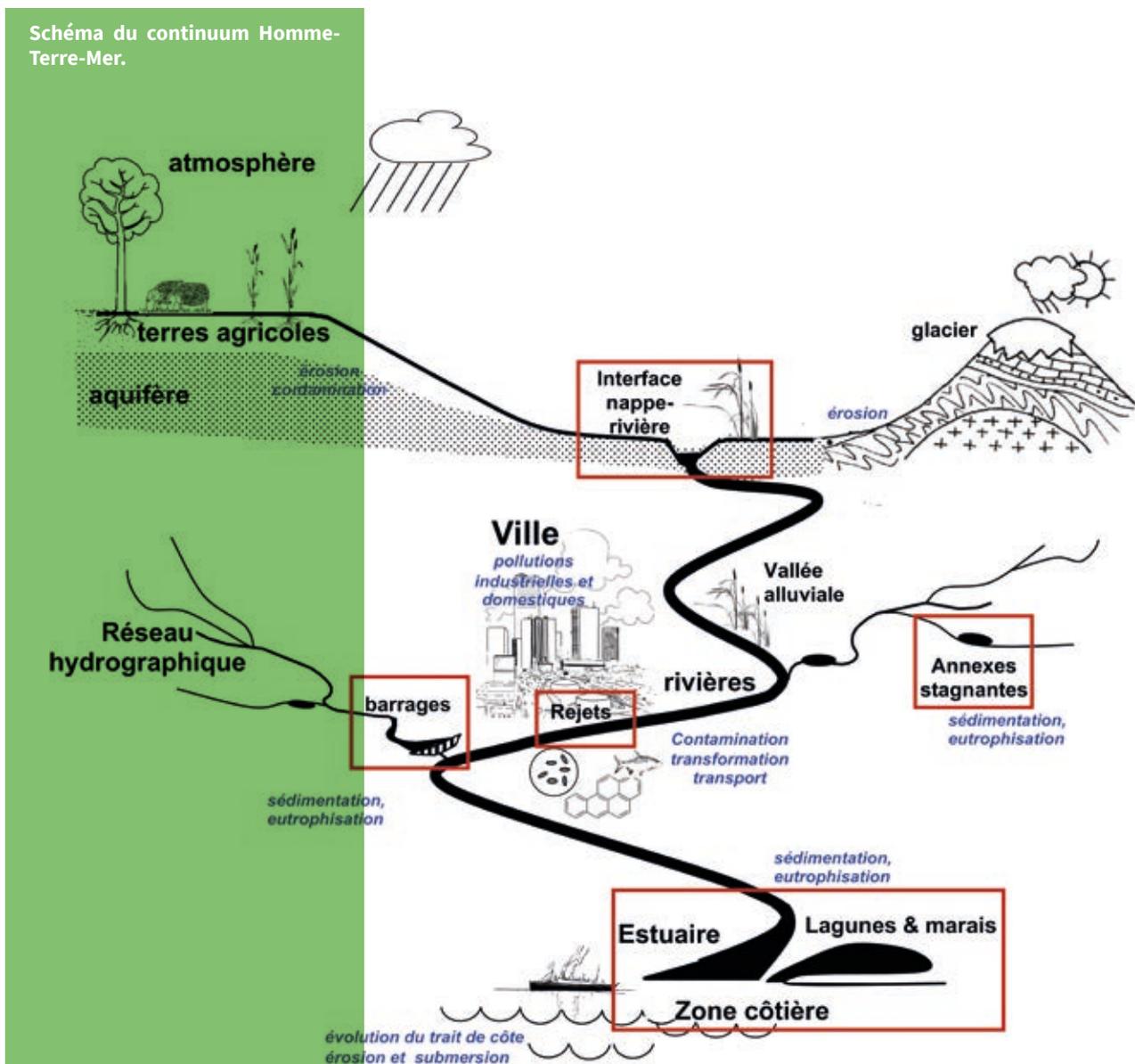
En termes méthodologiques, la modélisation à différentes échelles des échanges entre les surfaces continentales et l'atmosphère est assez bien développée mais souffre de **l'absence ou du manque de qualité des données de validation ou d'entrée des modèles**, notamment pour la prise en compte des interactions entre les compartiments de la zone critique (sol-végétation-surfaces-atmosphère). La quantification des échanges aux interfaces nécessite 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 méthodologiques (techniques de mesures rapides rendant possible la mesure des flux par eddy-covariance). La mesure directe du dépôt (notamment dépôt sec et neige) reste aussi une difficulté expérimentale non résolue pour bon nombre d'espèces particulières ou gazeuses. **Des développements méthodologiques, combinant expérimentation et modélisation, sont clairement indispensables pour mieux quantifier l'intensité des échanges d'énergie et de matière solide, liquide ou gazeuse entre les surfaces continentales et l'atmosphère**, notamment en milieux hétérogènes ou montagneux.



# LE CONTINUUM HOMME-TERRE-MER

Le continuum aquatique Homme-Terre-Mer (HTM) se conçoit comme une interconnection 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. Le continuum Homme-Terre-Mer ne se limite pas au continuum aquatique, mais

s'intègre dans le maillage des territoires et leurs aménagements. Les aménagements par l'Homme ont même un impact jusqu'au côtier, au-delà de la zone littorale. Si les thématiques des autres ateliers - *des eaux de surface aux eaux souterraines, des sols aux traits de côte, des éléments dissous ou particuliers aux gaz, etc.* - constituent aussi des objets de recherche du continuum HTM, il s'agit ici de comprendre et formaliser les processus bio-géo-physico-



chimiques aux interfaces, au-delà de l'unidirectionnel qui résulte souvent d'un chainage amont-aval de la connaissance et des modèles qui en découlent. Ainsi la prise en compte, dans les transferts d'eau et d'éléments, du biseau salé qui remonte vers le continent, ou des échanges de la rivière vers la nappe aquifère, etc. nécessite des recherches conceptuelles et expérimentales et la mobilisation de bases de données variées. Le développement de modèles de simulations numériques n'est pas non plus spécifique au continuum HTM, mais dans ce cadre, il s'agit de lever les verrouillages de la modélisation aux interfaces, pour aller au-delà du chainage de modèles vers un véritable dialogue au sein d'une plateforme intégrée de modélisation qui reste à construire, même s'il existe des outils isolés potentiellement candidats à ce type d'intégration. Depuis la dernière prospective des décloisonnements des communautés ont permis des avancées majeures grâce à des approches couplées (Riverstrahler et Eco-Mars 3D pour les flux de nutriments des continents à la zone côtière; CROCO- SYMPHONIE- MARS pour l'hydro-dynamique du littoral; des outils d'échanges océan-atmosphère dédiés au domaine côtier, etc.). Des progrès ont aussi été effectués en termes de modèles à complexité réduite, d'assimilation de données... afin d'opérer aux changements d'échelles, verrou évident dès lors que la modélisation se veut intégrative (cf. Figure page suivante).

Outre les développements instrumentaux pour la mesure à haute résolution, l'expérimentation reste aussi une priorité dans les gradients (oxydo-réduction, salinité, température, contaminations...). Dans un contexte de changement global, climatique et anthropique, les formalisations et paramétrisations des processus de nature biogéochimique ou physique nécessitent encore des connaissances. Des aller-retour permanents entre l'expérimentation et la modélisation sont une réelle garantie pour l'implémentation opérationnelle de ces processus dans les modèles.

Au cœur du continuum HTM, les estuaires, marais côtiers et lagunes sont typiquement des milieux complexes aux interfaces entre les surfaces continentales et la zone côtière qu'il faut être capable d'appréhender d'une manière générique malgré leurs spécificités. Schématiquement, ils sont le réceptacle de l'anthropisation des bassins amont et soumis à l'aval aux changements climatiques, bien qu'il soit difficile de clairement distinguer ces changements globaux.

Le continuum HTM implique non seulement la dimension spatiale 3D et le changement d'échelle, mais aussi la dimension temporelle (5D). Cette dimension temporelle implique les durées courtes de l'évènement extrême (tempête) mais aussi le long terme pour comprendre comment nos territoires ont été façonnés par la nature et l'Homme au fil du temps. Les études de métabolisme des territoires, c'est à dire, celles des circulations des matériaux, des éléments et

de l'énergie pour en quantifier les sources et les puits en lien avec les trajectoires socio-écologiques sont complémentaires des études expérimentales et de modélisation. Outre la spécificité du continuum HTM via ses interfaces/discontinuités, l'identité du continuum HTM réside aussi dans son besoin d'interdisciplinarité qui dépasse les Sciences de la Nature et de la Terre, car les actions de résilience et d'adaptation, de prévention et de remédiations ne peuvent être éprouvées sans l'expertise des Sciences Humaines et Sociales.

Toutes ces recherches font appel à des bases de données ou des archives qui requièrent des compétences spécifiques de leurs traitements et interprétations. L'acquisition de données à haute fréquence, la construction de nouveaux capteurs ouvre aussi de nouvelles voies de recherche qui demandent de nouveaux moyens, d'ingénieur.e.s notamment. Des efforts aboutis ont été effectués pour la visibilité des moyens d'observation, mais il reste à renforcer et faciliter l'accessibilité des données aux différentes communautés scientifiques.

Si de nombreux programmes sont le plus souvent interinstitutionnels et impliquent aussi des acteurs (gestionnaires, collectivités, ...), les liens avec le grand public sont encore ténus, et pourraient être renforcés par du personnel compétent, au plus près des laboratoires. Enfin, l'approche HTM peut apporter l'aspect multidimensionnel et transversal à cinq des objectifs du développement durable (ODD), au moins.

# NOUVELLES MÉTHODES ET NOUVELLES TECHNIQUES DE DÉVELOPPEMENT INSTRUMENTALES

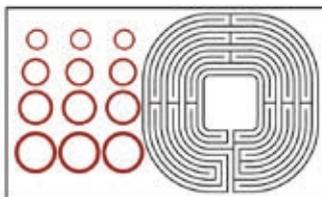
Notre compréhension de certains phénomènes relevant des SIC se heurte à divers verrous scientifiques et techniques, freinant l'acquisition de nouvelles connaissances fondamentales. Les questions scientifiques abordées par notre communauté nécessitent une caractérisation des mécanismes et processus hydro-bio-physico-chimiques à différents niveaux d'intégration, du bassin versant jusqu'à l'échelle moléculaire et atomique. De plus, les SIC se positionnent à l'interface de nombreuses disciplines confrontant les points de vue de géologues, (bio)géochimistes, géomorphologues, géophysiciens, écologues, biologistes (moléculaires), hydrologues, microbiologistes, écotoxicologues et bien d'autres. Les sciences environnementales doivent reposer sur le triptyque I) observation II) approche expérimentale III) modélisation. Ces spécificités se répercutent sur les outils, techniques et expérimentations mis en œuvre. La communauté SIC, qui dépasse les frontières

strictes du CNRS-INSU, développe depuis de nombreuses années des dispositifs expérimentaux très variés, adaptés à une multitude de systèmes et abordant la problématique du changement d'échelle. L'émergence de nouveaux outils permet régulièrement de lever de nouveaux verrous.

Ainsi, de nouveaux outils, tels que l'impression 3D et la « découpe laser » permettent de décupler les capacités de développement de micro-réacteurs en utilisant la microfluidique. Ce développement récent permet de renforcer la modélisation analogique en chimie par exemple, mais notre communauté SIC ne s'empare de cette approche que très partiellement. Accroître nos compétences collectives autour de ces aspects permettrait de tester des hypothèses de mécanismes, de reproduire des chemins réactionnels ou métaboliques en les découplant.

Le succès de nombreuses études repose sur l'observation et la caractérisation fine de l'évolution des paramètres intrin-

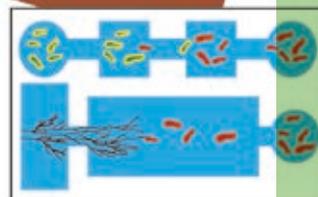
Decoupler les différents  
compartiments grâce  
à la microfluidique ?



Simuler l'hétérogénéité  
spatiale (réseau poreux)



Créer des gradients  
chimiques et des patches



Manipuler les interactions  
microbiennes

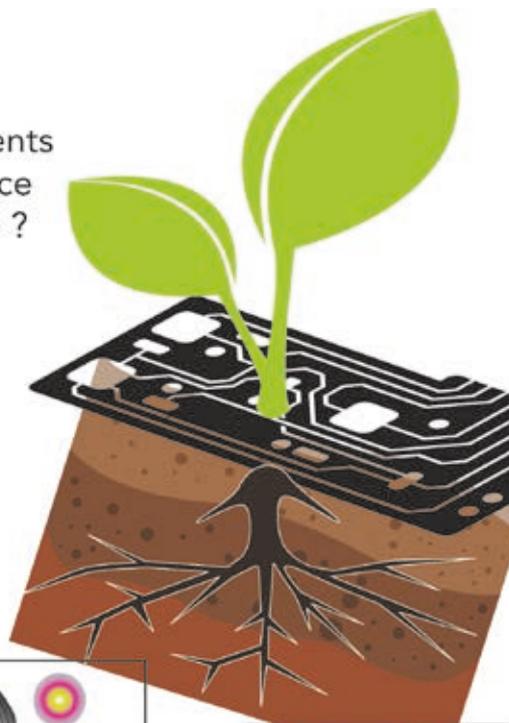


Schéma illustrant le concept de  
« build you own soil » à partir des dé-  
veloppements récents en microflui-  
dique (adapté de (Alekkett *et al.*,  
2018) ; <https://openclipart.org>)



Etudier des interactions  
rhizosphériques

sèques et extrinsèques aux systèmes. D'une part, l'utilisation de capteurs dans le domaine des SIC est ainsi indissociable des activités d'observations. Si le développement de capteurs physico-bio-chimiques dédiés à l'environnement a progressé, leur intégration dans les programmes d'observation est encore trop limitée du fait : (I) de nombreux verrous fondamentaux, technologiques et structurels; (II) d'un manque d'espaces de rencontres et de discussion entre les communautés qui développent des technologies de capteurs et celles qui les utilisent. Il s'agit donc de faire émerger une synergie et des passerelles entre les utilisateurs de la communauté SIC et les développeurs de capteurs (INC, INP...). D'autre part, il existe encore de nombreux verrous scientifiques et techniques concernant les échantillons fragiles et l'utilisation d'outils non-invasifs ou non-destructifs. En particulier, un rapprochement avec la biologie/médecine permettrait d'accroître le champ de connaissance et peut-être le panel d'outils d'imagerie de ces échantillons. Le défi actuel autour des outils de caractérisation est double à savoir améliorer encore les limites de détection dans des matrices complexes et les temps de comptage. L'objectif est de s'approcher de mesures en temps réel, tout en augmentant la capacité de « screening haut débit » afin d'aborder la variabilité et l'hétérogénéité des systèmes par de grands jeux de données résultant d'un échantillonnage serré. Enfin, l'augmentation exponentielle des données générées par les observations à haute fréquence, les dispositifs expérimentaux ainsi que les outils de caractérisation impose à notre communauté d'accroître ses compétences collectives concernant les modes de stockage et traitement des données (outils de la chimiométrie, transfert d'échelle, représentativité).

La France dispose de plateformes de caractérisation géochimique, isotopiques, d'imagerie au meilleur niveau international et possède des dispositifs expérimentaux d'échelle intermédiaires très performants tels que les écotrons, les mésocosmes. Si de nombreux verrous technologiques existent, il semble très important à court terme, d'accroître leur visibilité et ainsi de favoriser l'ouverture et l'utilisation de ces grands équipements par une meilleure communication, sensibilisation, formation sur les outils et les procédures ainsi qu'une aide au montage des propositions. Les travaux autour du milieu urbain, du changement climatique ou en ce qui concerne le cycle des polluants émergents (Perturbateurs endocriniens, nanoparticules, micro et nanoplastiques...) sont essentiels pour mieux participer aux ODD (Objectifs de Développement Durable), et ils nécessitent un effort important de structuration afin de mieux identifier et développer des dispositifs expérimentaux appropriés.

# ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES - ALÉAS ET RISQUES

## CONTEXTE SCIENTIFIQUE, TECHNIQUE ET SOCIÉTAL, LES ENJEUX

Nos sociétés contemporaines, bien que confrontées depuis des millénaires aux aléas « d'origine naturelle » et depuis quelques décennies aux aléas « d'origine anthropique », doivent aujourd'hui faire face à des catastrophes dont les conséquences s'intensifient du fait réchauffement global autant que de la vulnérabilité croissante de nos sociétés, après des décennies d'aménagements aberrants dont les exemples les plus évidents sont la littoralisation et l'urbanisation des lits de rivières, l'arrachage des bocages, etc. Ces conséquences concernent à la fois des menaces sur l'exposition des populations aux risques naturels, à la qualité des milieux (air, eau, sol), sur la sécurité alimentaire, et implique par conséquent des questionnements légitimes sur la durabilité de l'occupation et de l'usage des territoires. En conséquence, 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, autrement dit l'exposition des biens et des personnes au risque, 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 compréhension des phénomènes à l'origine des aléas liés à des situations extrêmes et des perturbations (ou stress environnementaux), les processus et leurs interactions.

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

Beaucoup de travaux ont été menés sur la compréhension des aléas naturels. Ils s'appuient sur des séries d'observations qui peuvent, parfois, souffrir d'un manque de profondeur temporelle lié à l'absence de données puisées au cœur des archives historiques ou à plus long terme. Par

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



ailleurs, d'autres risques sont aujourd'hui fortement négligés comme les conséquences sanitaires du volcanisme en Europe en cas d'éruption islandaise du type Eyjafjallajökull en 2010, comme ce fut le cas avec le volcan Laki en 1783, ou encore le risque de tsunami sur le littoral européen.

Ainsi émerge un certain nombre de questionnement qui sont autant de défis scientifiques pour l'avenir :

a) Comment suivre et quantifier l'amplitude de l'aléa, et ce sur des gammes d'échelles spatiale et temporelle très larges ?

b) Comment prendre en compte plusieurs « événements extrêmes » qui peuvent avoir pour origine une cascade d'aléas de nature différente (du type Fukushima en 2011) ?

c) Comment répondre aux enjeux d'observation long terme, à travers un développement instrumental dédié, et des observatoires *in situ* associés aux données spatiales ?

d) Comment progresser sur la formulation même du risque afin de proposer dans les approches de modélisation intégrée du risque.

De plus, la caractérisation du risque invite à la mise en place d'une approche interdisciplinaire associant des scientifiques des « biogéosciences », des historiens, des sociologues, des anthropologues, des psychologues et des géographes humains. *De facto*, elle implique de résoudre de redoutables défis parmi lesquels figurent en bonne place la construction et le partage d'un langage commun, ainsi que le développement d'une démarche scientifique commune. Ces différents enjeux sont schématisés sur la figure.

## PRIORITÉS POUR LES ANNÉES À VENIR ET IMPLICATIONS EN TERMES DE MOYENS

Pour l'avenir, les priorités concernent la constitution de bases de données sur un temps long (historiques et plus) documentant les aléas et leurs impacts, le décroisement des communautés en proposant des programmes multi-instituts (CNRS-INEE, CNRS-INSU, CNRS-INSHS), condition *sine qua non* si l'on veut mieux comprendre les événements extrêmes issus d'une cascade d'aléas, la prise en compte de l'instationnarité des systèmes étudiés, ainsi que des approches multi-échelles pour identifier les événements extrêmes aux échelles des impacts associés et comprendre les processus multi-échelles associés.

En termes de moyens, nous recommandons le lancement d'un programme national « Aléas et Événements extrêmes » qui permettrait la mise en place d'équipes multidisciplinaires fortement connectées aux attentes des décideurs publics (Direction Générale de la Prévention des Risques, Parcs Naturels, Conservatoire du Littoral, collectivités locales) et privés (notamment le monde de l'assurance et EdF) fortement préoccupés par la question des risques. Enfin, il faudrait

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 ODD

Ces recherches s'inscrivent pleinement dans le cadre des objectifs de développement durable quelque 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 contre les 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.



# 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-Odoux, 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, Gwenaél 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 Mougín, 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 ET GLOSSAIRE

## RÉFÉRENCES

Se référer au document complet de la Prospective pour le détail des références.

## 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)

