



# PROSPECTIVE

SURFACES ET INTERFACES  
CONTINENTALES 2018-2022

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS



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

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

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

## SOMMAIRE

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

---

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

---

Signataires :

**CNRS-INSU**

**CNRS-INEE**

**IRD**

**INRA**

**IRSTEA**

**IFREMER**

**BRGM**

**CNES**

**CEA**

**ANDRA**

**IFSTTAR**

**MÉTÉO-FRANCE**



# LE CONTINUUM HOMME-TERRRE-MER

## RÉSUMÉ GLOBAL

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

## CONTEXTE SCIENTIFIQUE, TECHNIQUE ET SOCIÉTAL, LES ENJEUX

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## PRIORITÉS POUR LES ANNÉES À VENIR

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

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

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

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

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

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

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

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

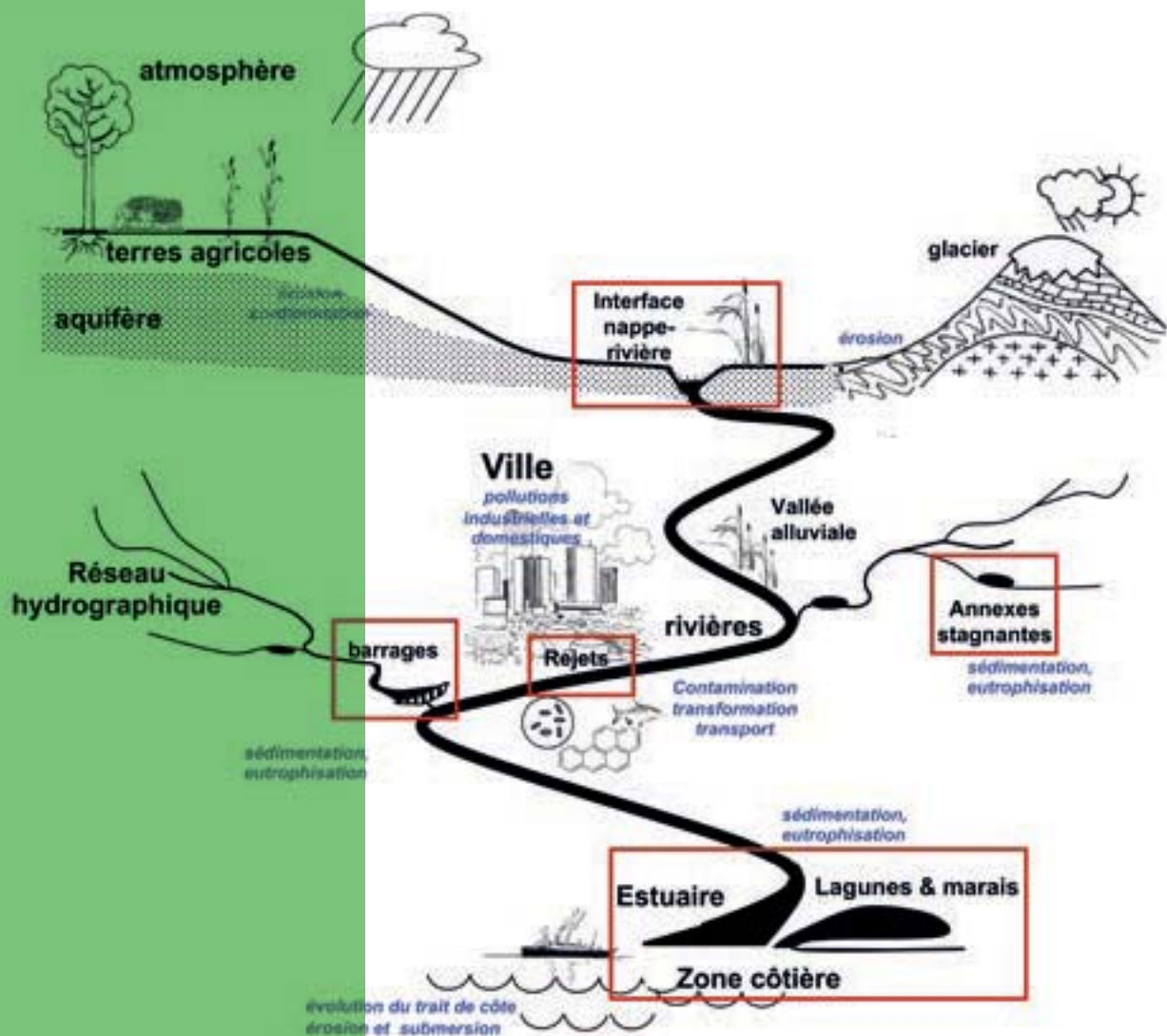
Si l'hydrodynamique des estuaires tidaux semble bien connue au premier ordre, la variabilité de la stratification et de la circulation 3D reste encore généralement mal décrite et quantifiée; or elle est a priori déterminante sur les transports d'eaux, de matière et d'éléments biogéochimiques entre estuaire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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## **IMPLICATIONS POUR LA RECHERCHE**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## Les chantiers et moyens d'observation

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

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

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

### Les moyens en personnels : besoins en compétence

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

## CONCLUSION

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

## RÉSUMÉ EXÉCUTIF

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

