



**HAL**  
open science

## **Prospective Surfaces et Interfaces Continentales : 2024-2028**

Sophie Ayrault, Gilles Pinay, Eric Ferrage, Nizar Abcha, Philippe Ackerer, Julien Ackerer, Cécile H. Albert, Elena Alekseenko, Anne Alexandre, Marie Alexis, et al.

### ► **To cite this version:**

Sophie Ayrault, Gilles Pinay, Eric Ferrage, Nizar Abcha, Philippe Ackerer, et al.. Prospective Surfaces et Interfaces Continentales : 2024-2028. INSU, CNRS; INEE, CNRS. 2024, 147 p. <insu-05045026>

**HAL Id: insu-05045026**

**<https://insu.hal.science/insu-05045026v1>**

Submitted on 24 Apr 2025

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



# Prospective Surfaces et interfaces continentales

Coordonnée par CNRS Terre & Univers  
et CNRS Écologie & Environnement

2024-2028



---

**INSU**



PROSPECTIVE

**Surfaces  
et interfaces  
continentales**

**2024-2028**

Sous la coordination de Sophie Ayrault — Directrice Adjointe Scientifique du domaine "Surfaces et interfaces continentales" de l'INSU, Gilles Pinay — Directeur Adjoint Scientifique "Écologie fonctionnelle" du CNRS Écologie & Environnement et Eric Ferrage — Président de la CS SIC.

## COORDINATION ÉDITORIALE

Julie Amblard

## BUREAU ET MEMBRES NOMMÉS DE LA CS SIC

Eric Ferrage (Président), Sandrine Anquetin (Vice-Présidente « Observation & Services Labéllisés »), Bruno Lanson (Vice-Président « Programme National EC2CO »), Manuel Pelletier (Vice-Président « Instrumentations »), Pierre Barré, Lucilla Benedetti, Catherine Bertrand, Julien Bouchez, Isabelle Calmet, Philippe Choler, Olivier Dauteuil, Olivier de Viron, Jérôme Demarty, Aurélie Goutte, Gwenaël Imfeld, Jérémy Jacob, Damien Jougnot, Jean Martins, Edouard Metzger, Sylvie Nazaret, Jean-Louis Rajot, Cyrille Violle.

## CONTRIBUTEURS AUX FICHES DE CONTRIBUTION

Nizar Abcha, Philippe Ackerer, Cécile Albert, Elena Alekseenko, Marie Alexis, Thierry Allard, Pierre Amato, David Amouroux, Anne-Sylvie André-Mayer, Eric Armynot du Chatelet, Marie Arnaud, Dominique Aubert, Julie Aufort, Cédric Bacour, Etienne Balan, Pierre Barré, Maialen Barret, Pascale Bauda, Thierry Beguiristain, Benjamin Belfort, Frida Ben Rais Lasram, Marc Benedetti, Anne-Claire Bennis, Patrick Billard, Gilles Billen, Elise Billoir, Françoise Binet, Anne-Kristel Bittebiere, Marc Blanchard, Hélène Blanchoud, Damien Blaudez, Patricia Bonin, Camille Bouchez, Guillaume Bouger, François Bourrin, Anne Bousquet-Mélou, Odile Bruneel, Simon Carrière, Corinne Casiot, Antoine Casquin, Charlotte Catrouillet, Aurélie Cébron, François Chabaux, Nicolas Champollion, Bruno Charriere, Mathieu Chassé, Pascal Claquin, Contribution collective de l'IPREM, Contribution collective du LEMAR, Contribution collective du CNRM, Yoann Copard, Marie-Christine Cormier-Salem, Samuel Coussy, Philippe Cuny, Michaël Danger, Jose Darrozes, Karin Dassas, Emilie Dassie, François De Vleeschouwer, Maxime Debret, Christine Delire, Claire Delon, Nicolas Delpierre, Simon Devin, Laurent Dezileau, Agnès Ducharne, Jérôme Duval, Fabien Esculier, Olivier Evrard, Marianne Font-Ertlen, Julien Fouché, Anthony Foucher, Matthieu Fournier, François Fromard, Lucille Furgerot, Laure Gandois, Antoine Gardel, Josette Garnier, Simon Gascoin, Cécile Gautheron, Frédéric Gérard, Laure Giamberini, Ludovic Gielly, Charline Giguët-Covex, Sébastien Gogo, Claire Gollety, Dominique Gommery, Maria Soledad Goni Urriza, Swanne Gontharet, Aurélie Goutte, Régis Grimaud, Laure Guerit, Elodie Guigon, Vincent Guinot, Rémy Guyoneaud, Sophia Hansson, Basile Hector, Marina Héry, Fabien Hubert, Gwenaël Imfeld, Françoise Immel, Marie-Pierre Isaure, Jérémy Jacob, Abderrahim Jardani, Emilie Jardé, Laurent Jeanneau, Stanislav Jelavić, Anne Jost, Damien Jougnot, Jean Kempf, Philippe Kerhervé, Bahia Khalfaoui, Sylvain Kuppel, Jérôme Labanowski, Thierry Labasque, Patrick Lachassagne, Laurent Lanceleur, Bruno Lanson, Goulven Laruelle, Béatrice Lauga, Valérie Le Dantec, Séverine Le Faucheur, Marie Le Jean, Pierre Le Pape, Gael Le Roux, Marine Legrand, Jean-François Léon, Nolwenn Lesparre, Laurence Lestel, Jean-Marc Limousin, Esméralda Longépée, Fanny Louis, Wolfgang Ludwig, Fabienne Maignan, Odin Marc, Cyril Marchand, Virginie Marécal, Yves Marrochi, Rémi Marsac, Jeremy Masbou, Armand Masion, Nicolas Massei, Sylvie Massemin, Olivier Merlin, Arnaud Mialon, Emma Michaud, Cécile Militon, Laetitia Minguez, Leslie Mondamert, Anne Mone, Mathilde Monperrus, Jean-Sébastien Moquet, Valérie Morel, Guillaume Morin, Samuel Morin, Dominique Mouazé, Jean-Marie Mouchel, Emilie Muller, Benjamin Musnier, Jean Nabucet, Julien Nemery, Nathalie Niquil, Priscia Oliva, Laurent Orgogozo, Catherine Ottlé, Ludovic Oudin, Christophe Pagnout, Carmen Palacios, Geremy Panthou, Pierre-Yves Pascal, Sylvain Payraudeau, Thierry Pellarin, Jean-Louis Perrin, Christophe Peugeot, Jean-Philippe Pezy, Thierry Pigot, Sébastien Pinel, Valérie Plagnes, Pascal Poupin, Hugues Preudhomme, Sophie Prud'homme, Christophe Rabouille, Mélanie Raimonet, Guillaume Ramillien, Anthony Ranchou-Peyruse, Faycal Rejiba, Éléonore Resongles, Jean Riotte, Tony Robinet, Fabrice Rodriguez, Christian Salles, Elodie Salmon, Thomas Saucède, Sabine Sauvage, Nicolas Savoye, Irene Schimmelpfennig, François Schmitt, Johann Schnyder, Mathieu Sebilo, Loïc Segalen, Antoine Séjourné, Alexei Sentchev, Lucia Seoane, Liudmila Shirokova, Marie Silvestre, Anaëlle Simonneau, Yann Sivry, Delphine Six, Aldo Sottolichio, Cyprien Soulaïne, Tiphaine Tallec, Roman Teisserenc, Bernadette Tessier, Mickael Tharaud, Aubin Thibaut de Chanvalon, Thomas Thiebault, Vincent Thieu, Gérard Thouzeau, Christophe Turnassat, Danièle Valdes, Eric Van Hullebusch, Deborah Verfaillie, Nathalie Vigier, Didier Visin, Nicolas Vuichard, Stéphane Vuilleumier, Xiaoni Wang, Sylvain Weill, Asfaw Zegeye, Pierpaolo Zuddas.

## **PARTICIPANTS AU COLLOQUE DE PROSPECTIVE**

Julien Ackerer, Philippe Ackerer, Anne Alexandre, Philippe Amiotte-Suchet, Sandrine Anquetin, Nicolas Arnaud, Mélanie Auffan, Sophie Ayrault, Valérie Ballu, Agnès Baltzer, Audrey Beaussart, Béatrice Bechet, Catherine Bertrand, Eric Beucler, Stéphane Blanc, Marc Blanchard, Juliette Blanchet, Hélène Blanchoud, Julien Boe, Patricia Bonin, Myriam Bormans, Julien Bouchez, Brice Boudevillain, Guillaume Bouger, Olivier Bour, Philippe Bousquet, Isabelle Braud, Yves Brunet, Hélène Budzinski, Damien Calmels, Isabelle Calmet, Corinne Casiot, Charlotte Catrouillet, Mathieu Chasse, Ghassan Chebo, Philippe Choler, Jean-Martial Cohard, Steeve Comeau, Yoann Copard, Alain Crave, Julien Cretat, Olivier Dauteuil, Jean-Raynald De Deuzy, Maxime Debret, Christophe Delacourt, Julien Deloffre, Jérôme Demarty, Laurent Dezileau, Aline Dia, Jean-François Doussin, David Doxaran, Laurent Drapeau, Agnès Ducharne, Céline Duwig, Pierre Faure-Catteloin, Eric Ferrage, Cyrille Flamant, Cyril Fleurant, Clémentine Fritsch, Catherine Galy, Mathieu Gautier, Frédéric Gerard, Emmanuelle Geslin, Laure Giamberini, Martin Giard, Daniel Gilbert, Sébastien Gogo, Elodie Guignon, Stéphane Guillot, Eric Guilyardi, Damien Guinoiseau, Florence Habets, Annette Hofmann, Fabien Hubert, Gwenaël Imfeld, Françoise Immel, Jérémy Jacob, Emilie Jarde, Dominique Joly, Damien Jougnot, Pierre Labadie, Thierry Labasque, Jérôme Labille, Patrick Lachassagne, Yvan Lagadeuc, France Lagroix, Dimitri Lague, Bruno Lanson, Anniët Laverman, Annaïg Le Guen, Pierre Le Pape, Romain Leclerc, Jean-François Leon, Nolwenn Lesparre, Laurence Lestel, Emily Lloret, Laurent Longuevergne, Wolfgang Ludwig, Fabienne Maignan, Grégoire Maillet, Christelle Marlin, Jean-Michel Martinez, Jean Martins, Nicolas Massei, Olivier Mathieu, Edouard Metzger, Emma Michaud, Raymond Michels, Laurent Michot, Valérie Michotey, Laetitia Minguez, Florence Moatar, Gilles Molinie, Jean Nabucet, Sylvie Nazaret, Guillaume Paris, Sylvain Payraudeau, Thierry Pellarin, Manuel Pelletier, Jean-Louis Perrin, Fabienne Petit, Sabine Petit, Christophe Peugeot, Caroline Pierre, Anne-Catherine Pierson-Wickmann, Raphaël Pik, Gilles Pinay, Christophe Piscart, Sandrine Plaud-Guerin, Anne Puissant, Cécile Quantin, Antoine Rabatel, Christophe Rabouille, Olivier Ragueneau, David Renault, Pierre Renault, Céline Reyle, Jean Riotte, Henri Robain, Fabrice Rodriguez, Jérôme Rose, Isabelle Ruin, Géraldine Sarthou, Dirk Schmeller, Anaëlle Simonneau, Aldo Sottolichio, Julien Thevenot, Eric Thiebaut, Vanessa Tocut, Christophe Tournassat, Eric Van Hullebusch, Delphine Vantelon, Nathalie Vigier, Xiaoni Wang-Faivre, Bastien Wild.

## **MEMBRES DES GROUPES DE TRAVAIL ET CONTRIBUTEURS AU RAPPORT**

Cécile Albert, Anne Alexandre, Pierre Amato, Sandrine Anquetin, Nicolas Arnaud, Cécile Asanuma-Brice, Mélanie Auffan, Julie Aufort, Sophie Ayrault, Étienne Balan, Pierre Barré, Béatrice Béchet, Catherine Bertrand, Stéphane Blanc, Juliette Blanchet, Julien Boe, Patricia Bonin, Gudrun Bornette, Julien Bouchez, Olivier Bour, Isabelle Braud, Elisa Bruni, Isabelle Calmet, Corinne Casiot, Florence Cayocca, Aurélie Cébron, Aude Chambodut, Nicolas Champollion, Mathieu Chassé, Philippe Choler, Jean-Martial Cohard, Yoann Copard, Carole Dalin, Emilie Dassié, Olivier Dauteuil, Mélanie Davranche, Maxime Debret, Christophe Delacourt, Christine Delire, Claire Delon, Jérôme Demarty, Delphine Destoumieux-Garzon, Simon Devin, Aline Dia, Agnès Ducharne, Agathe Euzen, Olivier Evrard, Eric Ferrage, Clémentine Fritsch, Jérôme Gaillardet, Simon Gascoïn, Cécile Gautheron, Mathieu Gautier, Daniel Gilbert, Virginie Girard, Vincent Gordard, Bertrand Guenet, Laure Guérit, Florence Habets, Basile Hector, Martine Hossaert, Gwenaël Imfeld, Françoise Immel, Jérémy Jacob, Emilie Jardé, Lionel Jarlan, Laurent Jeanneau, Marc Jolivet, Dominique Joly, Damien Jougnot, Jean Kempf, Sylvain Kuppel, Jérôme Labanowski, Yvan Lagadeuc, Bruno Lanson, Martine Lanson, Valérie Le Dantec, Annaïg Le Guen, Pierre Le Pape, Hélène Lecomte, Jean-François Léon, Clément Levard, Laurent Longuevergne, Odin Marc, Guillaume Marchand, Christelle Marlin, Rémi Marsac, Béatrice Marticoarena, Jean-Michel Martinez, Jean Martins, Nicolas Massei, Sylvie Massemin, Olivier Merlin, Arnaud Mialon, Laetitia Minguez, Anne Mone, Guillaume Morin, Emilie Muller, Benjamin Musnier, Jean Nabucet, Sylvie Nazaret, Geremy Panthou, Thierry Pellarin, Manuel Pelletier, Fabienne Petit, Christophe Peugeot, Caroline Pierre, Marie-Claire Pierret, Raphaël Pik, Gilles Pinay, Christophe Piscart, Sandrine Plaud-Guérin, Anne Puissant, Christophe Rabouille, Damien Raclot, Mélanie Raimonet, Jean-Louis Rajot, Eléonore Resongles, Jean Riotte, Philip Roche, Fabrice Rodriguez, Isabelle Ruin, Cornélia Rumpel, Géraldine Sarret, Sabine Sauvage, Nicolas Savoye, Irene Schimmelpfennig, Dirk Schmeller, Anaëlle Simonneau, Jeroen Sonke, Tiphaine Tallec, Thomas Thiebault, Nathalie Vigier, Stéphane Vuilleumier.

## **CRÉATION ARTISTIQUE (ILLUSTRATIONS D'OUVERTURE DE CHAPITRES)**

Bianca Touchart (Aux Couleurs de l'eau).

## **IMPRESSION**

CNRS DR1 IFSEM secteur de l'imprimé

## **CONCEPTION/ MAQUETTE**

Page B

## **DÉCEMBRE 2024**



# Table des matières

<b>01</b>	Avant-propos	6
	Méthodologie et déroulé de l'exercice de prospective SIC	8
	Bilan de la dernière prospective	12
<b>02</b>	<b>DÉFIS THÉMATIQUES</b>	
	Interfaces et Continuums dans les SIC	36
	Intégration des différentes échelles d'espace et de temps dans l'étude des SIC	50
	Stocks & Ressources naturelles (eau, carbone et métaux critiques): durabilité dans un contexte de changement global et de limites planétaires	60
	Contaminants & Pollutions: devenir, impacts et solutions	72
	Zone Critique Urbaine et Péri-Urbaine	88
<b>03</b>	<b>DÉFIS MÉTHODOLOGIQUES ET DE MISE EN ŒUVRE</b>	
	Observons les observatoires	98
	Données en SIC: Mesures et instrumentation, services et entrepôts, outils et modèles	104
	Continuum Sciences-Société et Transdisciplinarité: coconstruction de la recherche-action pour accompagner la transition des territoires	116
	Responsabilité environnementale de la recherche en SIC	124
	Formations — Métiers — Compétences	134
	Programme National Écosphère Continentale et Côtière — EC2CO	142
<b>04</b>	Glossaire	146

# Avant-propos

Nos sociétés ont plus que jamais besoin de la science. La pression exercée par l'humanité sur son environnement est manifeste à l'échelle planétaire, des pôles jusqu'à l'équateur, des abysses océaniques aux sommets les plus élevés, des forêts amazoniennes aux cœurs mêmes de nos campagnes. Elle symbolise l'entrée de l'Homme dans l'Anthropocène, cette époque nouvelle où l'influence humaine sur la Terre est devenue globale et prépondérante. Comprendre les grands cycles et les mécanismes complexes qui régissent cette époque est impératif pour faire en sorte qu'elle ne devienne pas la dernière ère de l'humanité. En effet, jamais dans leur histoire, les sociétés humaines n'avaient été confrontées à un défi d'une telle ampleur, susceptible de mettre en péril, sinon leur existence, du moins leur organisation et leurs idéaux.

Dans ce contexte inédit, tout doit être appréhendé pour être repensé : l'accès aux ressources essentielles telles que l'eau et les sols, l'exposition aux risques naturels et anthropiques et à leurs interactions, la préservation de la biodiversité, l'impact de nos activités quotidiennes... Comprendre ces mécanismes, c'est comprendre chacun des éléments de notre environnement qui, ensemble, garantissent les services écosystémiques indispensables à la survie de nos sociétés.

Cette quête de savoir est le rôle fondamental de la Science, qui se doit non seulement d'expliquer le monde mais aussi d'éclairer les décideurs politiques, les acteurs associatifs, les professionnels, et la société civile dans son ensemble, sur les trajectoires possibles qu'ils pourront ensuite choisir d'emprunter.

Comprendre l'Anthropocène, c'est avant tout appréhender les socio-écosystèmes dans leur structure et leur fonctionnement, à travers une approche nécessairement globale, parfois désignée par le concept de « zone critique ». Cette fine couche à la surface de l'écorce terrestre abrite l'humanité et renferme les ressources naturelles, terrestres et marines, vitales, formées sur des échelles de temps géologiques longues. Ces ressources, impactées par les activités humaines sur des périodes de temps relativement courtes allant de siècles à millénaires, peuvent également évoluer très rapidement sous l'effet d'événements extrêmes liés aux forçages climatiques, anthropiques, biologiques ou telluriques. C'est pourquoi la démarche scientifique doit donc être fondamentalement interdisciplinaire, car une approche disciplinaire, aussi sophistiquée soit-elle, ne suffit plus à saisir toute la complexité de ces systèmes intimement couplés.

La communauté de recherche française se distingue par son excellence et une solide expertise pour relever ces défis. Le CNRS, ainsi que ses partenaires naturels que sont les organismes de recherche et les universités, a développé une communauté dédiée aux sciences de l'environnement, qui a émergé au cours des vingt dernières années avec ses propres paradigmes, outils et méthodes : la communauté des Surfaces et Interfaces Continentales (SIC). Grâce à des exercices réguliers de prospective, elle a tracé des orientations de plus en plus claires, s'imposant ainsi, avec détermination, au cœur des grands défis contemporains. De la physique à la biologie, de la géologie à l'écologie, des sciences humaines et sociales aux sciences spatiales, cette communauté rassemble désormais une large partie des disciplines nécessaires à la compréhension des socio-écosystèmes, inventant ainsi une nouvelle discipline : celle des sciences de la durabilité.

La communauté de recherche française est particulièrement bien armée pour relever ces défis. Le succès des PEPR FairCarboN et One Water dans le cadre des appels à projets du Programme d'Investissements d'Avenir (PIA) en est un exemple marquant. Ces projets sont issus des réflexions stratégiques amorcées lors de l'atelier de prospective de 2017, où les axes de recherche

**“En effet, jamais dans leur histoire, les sociétés humaines n’avaient été confrontées à un défi d’une telle ampleur, susceptible de mettre en péril, sinon leur existence, du moins leur organisation et leurs idéaux.”**

prioritaires ont été définis. Le programme national EC2CO a également joué un rôle crucial en soutenant l’émergence et en renforçant la structuration de cette communauté, favorisant ainsi sa capacité à répondre efficacement aux appels d’offres compétitifs dans des délais souvent très courts. Ces avancées démontrent non seulement l’impact direct de la communauté SIC au sein des instituts de recherche français, mais également son influence grandissante au-delà de ses domaines traditionnels, grâce à une approche interdisciplinaire et réflexive sur les données et les observatoires.

Aujourd’hui, forte de ses accomplissements et de sa structuration, la communauté des surfaces et interfaces continentales s’interroge sur son rôle et sur son impact, notamment dans la transformation de la science en action concrète. Les réflexions menées abordent le continuum Sciences-Société, ainsi que la coconstruction de la recherche-action, comme autant de leviers pour accompagner la transition durable des territoires tout en repensant ses responsabilités environnementales.

Cette prospective est empreinte de confiance et de richesse intellectuelle, inspirant l’ensemble des sciences de la Terre et de l’Environnement au-delà des attentes initiales placées en elle il y a plus de vingt ans. Merci à celles et ceux qui ont su mettre en œuvre une réflexion collective aboutissant à cette synthèse éclairante et prometteuse.

Nicolas Arnaud

*Directeur de l’Institut National des  
Sciences de l’Univers*

Stéphane Blanc

*Directeur de CNRS  
Écologie & Environnement*

# Méthodologie et déroulé de l'exercice de prospective SIC

La commission spécialisée « Surface et Interfaces Continentales » (CS SIC) a été chargée par les directions de l'INSU et de CNRS Écologie & Environnement d'organiser ce travail de prospective. Ainsi, la CS SIC a reçu pour mandat de coordonner, organiser et formaliser la prospective à venir, en s'appuyant sur une large consultation de la communauté et des partenaires institutionnels et académiques. Le premier travail de réflexion par la CS SIC autour de cette prospective a eu lieu en avril 2023 et s'est construit autour de plusieurs étapes et événements entre juin 2023 et septembre 2024 (Figure 1).

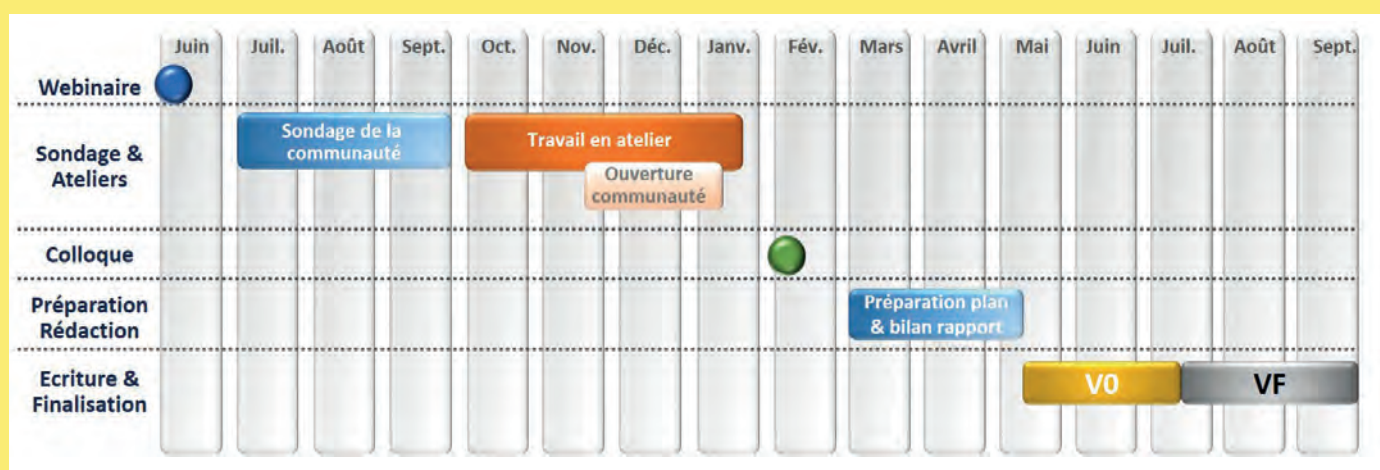


Figure 1. Méthodologie et chronologie de l'exercice de prospective SIC.

## Webinaire de lancement de la prospective SIC

Le premier événement a été un webinaire officiel de lancement de la prospective SIC, dont l'objectif était de présenter le travail à venir et de mobiliser la communauté SIC, i.e., communauté des acteurs des recherches en SIC, de tout institut du CNRS et de tout organisme. Organisé le 2 juin 2023 (Figure 1), cet échange a permis à la communauté de suivre plusieurs présentations en distanciel. Celles-ci portaient sur

les attentes institutionnelles de ce travail de prospective, les premiers éléments de perspectives sur les services d'observation des SIC et le programme national EC2CO, ou relatifs à un calendrier préliminaire et aux pistes de fonctionnement et à leurs mises en pratique.

## Sondage de la communauté SIC

Suite à ce lancement officiel, la CS SIC a proposé une large consultation de la communauté scientifique travaillant sur les SIC. Cette consultation s'est déroulée entre juillet et septembre (Figure 1)

sur le principe d'une fiche de contribution à la prospective, pouvant être soumise de façon individuelle ou collective. Pour guider la rédaction, 21 thèmes scientifiques ont été proposés, accompagnés d'un texte explicatif, mais les contributions étaient également libres de suggérer de nouveaux thèmes non initialement présentés. Cette consultation a suscité un grand enthousiasme et une forte mobilisation de la communauté SIC, se traduisant par la réception de 95 fiches aux formats variés, allant de quelques lignes à une dizaine de pages, rédigées individuellement ou par plusieurs laboratoires. Il est

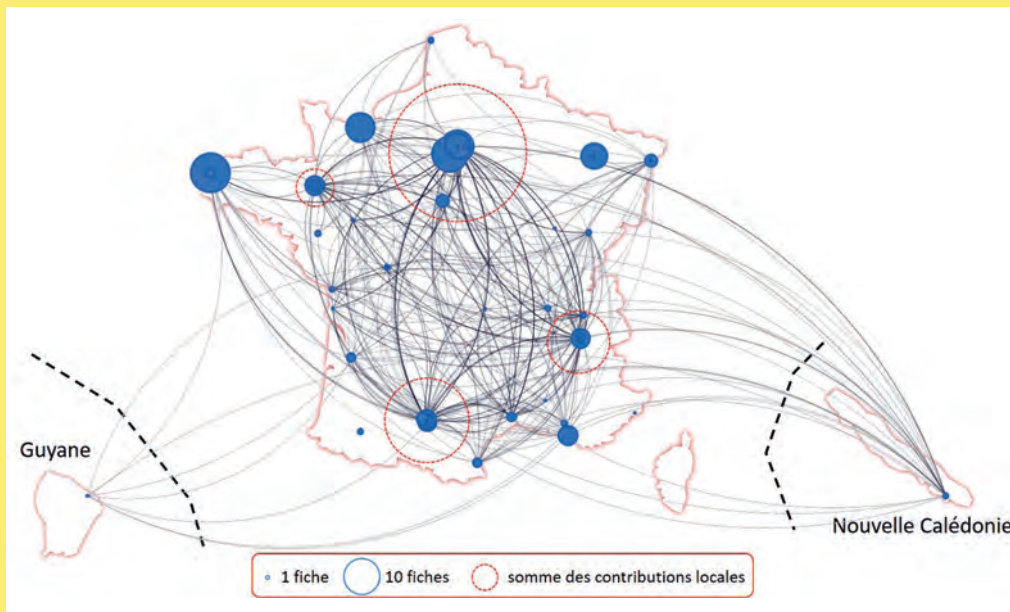


Figure 2. Analyse des fiches de contribution à la prospective SIC. Répartition géographique et réseau d'interaction via la corédaction de fiches de contribution par plusieurs unités.



intéressant de noter que l'ensemble des partenaires et acteurs de la recherche dans le domaine SIC (e.g. CNRS, universités, Ifremer, INRAe, IRD, MNHM, CEA, BRGM, etc.) ont contribué à cet exercice de consultation, permettant ainsi de dresser un état des lieux très complet des travaux et centres d'intérêt de la communauté (Figure 2). Les 95 contributions reçues concernent environ 250 personnes issues de 78 unités de recherches. Bien que probablement partielle, l'analyse de la répartition géographique de ces fiches a révélé un maillage important

du territoire national et de ses pôles de densité (Figure 2). De plus, il a été possible de construire un réseau d'interactions entre unités, à partir de la corédaction des fiches. Ce réseau met en évidence l'existence d'une communauté très active autour des questions fondamentales de la recherche sur les SIC (Figure 2).

## Travail en atelier

Cette forte mobilisation exprimée à travers ces contributions écrites s'est poursuivie par un travail de la CS SIC autour de la définition de neuf ateliers regroupant les différents

thèmes identifiés collectivement (Tableau 1). Une réunion début octobre 2024 avec l'ensemble des membres de ces groupes fut l'occasion de présenter les attendus et leur fonctionnement sur la période octobre 2023 — janvier 2024 (Figure 1). Durant cette période, sous l'impulsion des responsables d'ateliers, le travail a consisté en la lecture et l'intégration de l'ensemble des fiches pour structurer les

Tableau 1. Les différents ateliers et groupes de travail dans le cadre de la prospective SIC.

Atelier 1 : Zone Critique urbaine et péri-urbaine

Atelier 2 : Données en SIC : mesures et instrumentations, services et entrepôts, outils et modèles

Atelier 3 : Observons nos observatoires

Atelier 4 : Interfaces et continums dans les SIC

Atelier 5 : Continuum Sciences-Société et transdisciplinarité : coconstruction de la Recherche-Action pour accompagner la transition des territoires

Atelier 6 : Stocks et ressources naturelles (eau, carbone et métaux critiques) : leur durabilité dans un contexte de changement global et de limites planétaires

Atelier 7 : Contaminants et pollutions : devenir, impacts et solutions

Atelier 8 : Intégration des différentes échelles d'espace et de temps dans la Zone Critique

Atelier 9 : Responsabilité environnementale de la recherche en SIC

Groupe de travail : Bilan de la dernière prospective SIC

Groupe de travail : Besoins en formations/Compétences/Métiers

idées, ainsi qu'en la préparation d'un document de synthèse préliminaire, non finalisé, laissant possibilité à la communauté d'être enrichi en amont et pendant le colloque de prospective. Ce travail considérable réalisé par les groupes d'animation, enrichi par la diversité des contributions reçues, a été accompagné d'une quinzaine de réunions hebdomadaires inter-ateliers afin de favoriser les échanges et discussions autour de la méthodologie. Durant cette période, deux groupes de travail ont également été créés : l'un chargé du bilan de la dernière prospective, et l'autre, de l'étude des besoins en termes de formations, compétences et métiers.

## Le colloque de prospective SIC à Saint-Malo

Le colloque de prospective SIC s'est déroulé sur quatre demi-journées, du 5 février 2024 en début d'après-midi au 7 février 2024 en fin de matinée, à Saint-Malo (Figure 1, Figure 3), et a réuni 156 personnes. Le programme comportait différents temps forts :

- Des présentations de la part de la direction des Instituts INSU et CNRS Écologie & Environnement, des directions adjointes scientifiques, et de la CS SIC.
- Des présentations concernant les actualités de la Section 30, des CID 52 & 55 du CoNRS.
- Des présentations sous forme de keynotes, de la part de personnalités invitées.

- Des restitutions sous forme de posters des travaux en ateliers et des groupes de travail. Chaque participant a pu alimenter les réflexions sous forme de post-it pendant la durée entière du colloque.
- Des sessions de travail en parallèle, en ateliers d'une durée de deux heures. Les ateliers ont fonctionné en mode « World Café », permettant à l'ensemble des participants d'échanger et de formaliser les questions et les besoins et ainsi compléter le travail réalisé en amont du colloque.
- Des restitutions à chaud des échanges en ateliers et des groupes de travail.
- Une table ronde portant sur la responsabilité environnementale et l'évolution des pratiques de la Recherche en SIC.

Figure 3. Le colloque de prospective SIC du 5 au 7 février 2024 à Saint-Malo.



Dans le but de mieux cerner les attendus et l'évaluation de la communauté au regard de l'exercice de prospective, la CS SIC a également conduit deux sondages. Le premier a été réalisé en amont du colloque, au moment de l'inscription, et visait à faire un état des lieux de la motivation des participants pour cet exercice de prospective. Les résultats du sondage ont révélé une participation importante et renouvelée par rapport au colloque des précédentes prospectives de 2017 (seuls 33 % des participants étaient présents en 2017), une participation limitée des jeunes chercheurs (la majorité des participants appartenant à la tranche d'âge 45-55 ans), ainsi qu'un intérêt variable pour les différentes parties du programmes.

Le second sondage a eu lieu à la fin du colloque afin d'évaluer les ressentis de la communauté concernant l'exercice réalisé (83 réponses sur les 156 participants, Figure 4). Parmi les points saillants, il a été noté que, pour les personnes ayant participé aux deux derniers colloques, bien que la communauté et la qualité des échanges soient similaires, l'organisation de cette prospective était très différente. Les différentes présentations ont

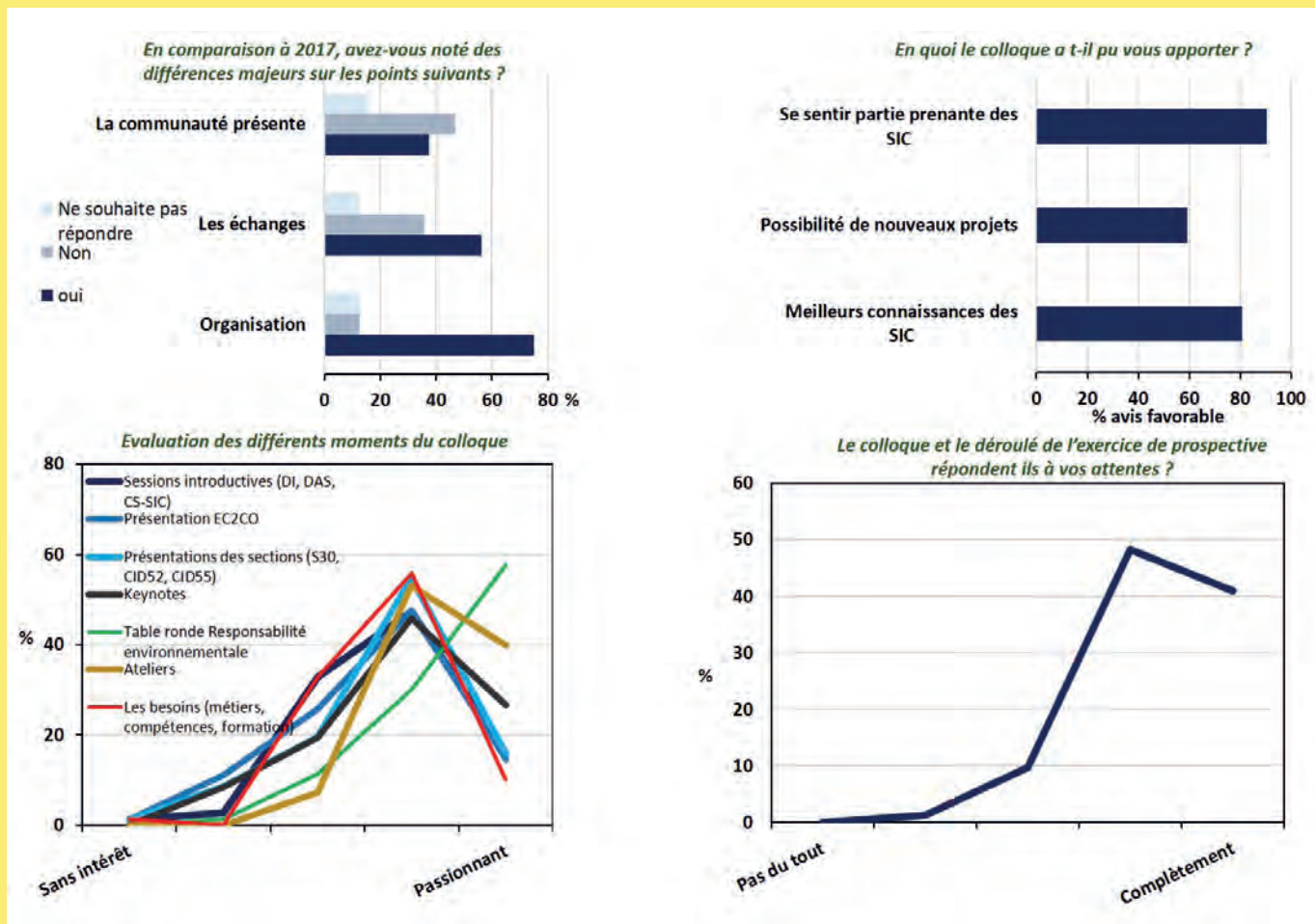


Figure 4. Éléments d'évaluation du colloque et du travail de prospective par les participants au colloque de prospective SIC du 5 au 7 février 2024 à Saint-Malo.

été bien évaluées avec un avis particulièrement positif concernant la table ronde consacrée à la responsabilité environnementale et à l'évolution des pratiques dans la recherche en SIC. Ce moment d'échange avec la salle fut particulièrement riche et constructif, abordant une question cruciale pour l'ensemble de la communauté. Globalement, l'ensemble des participants ont émis une évaluation positive à très positive du colloque et du déroulement global de cette consultation et de la construction de la prospective SIC (Figure 4).

## Rédaction du rapport de prospective SIC

Le colloque à Saint-Malo a été le moment du passage entre la synthèse préliminaire des idées et les

propositions d'actions. La période mars-mai 2024 a été consacrée à la construction du rapport de prospective, avec des réflexions menées au sein de la CS SIC avec les responsables d'ateliers et des groupes de travail. Il a été décidé de construire ce rapport sur la base des périmètres des ateliers avec des chapitres à vocation thématiques et des chapitres en lien avec les défis méthodologiques et de mise en œuvre. Un chapitre dédié au bilan de la dernière prospective a également été rédigé avec l'aide des porteurs des anciens ateliers ainsi que des personnes invitées à présenter un fait marquant. La version préliminaire a été validée en juillet par la CS SIC et a fait l'objet d'un travail d'harmonisation et de finalisation en comité restreint en juillet 2024. Un glossaire des acronymes est reporté en fin de

rapport. Enfin, un résumé exécutif à destination des organismes et des décideurs a été rédigé à la suite de ce travail.

**Note sur l'écriture inclusive :** Bien que l'écriture inclusive ait pour objectif de promouvoir l'égalité des genres dans la langue écrite, nous avons choisi, pour des raisons de lisibilité et de fluidité et en conformité avec les recommandations officielles, de ne pas l'utiliser dans cet ouvrage. Cependant, cette décision n'enlève rien à notre engagement en faveur de l'égalité entre les genres et de la représentation inclusive de toutes les personnes.

# Bilan de la dernière prospective

Lors de l'exercice de prospective précédent (2017), l'effort collectif avait permis de souligner les besoins de relever un certain nombre de défis d'ordre thématiques et structurels pour la communauté SIC. Ce travail s'est concrétisé par la publication du document de synthèse (septembre 2019), composé d'un chapitre portant sur le bilan des prospectives 2013-2017 et de 9 chapitres thématiques.

Dans le cadre de ce rapport de la prospective (2024-2028), ce premier chapitre a vocation de dresser les progrès réalisés et les freins qui perdurent pour les 9 thématiques du précédent exercice. Cette partie a été écrite avec l'aide des porteurs des ateliers de la précédente prospective ainsi que des informations issues des contributions de la communauté. De plus, il a été choisi de mettre en lumière quelques faits marquants illustrant les progrès, les innovations ou de nouvelles opportunités pour la communauté SIC depuis 2017.

Un dernier point de bilan porte sur la coconstruction des recherches en SIC avec les communautés de Sciences Humaines et Sociales (SHS). Cette coconstruction SIC-SHS, qui n'avait pas été adressée en tant que telle lors de la précédente prospective (2018-2022), avait toutefois été évoquée comme souhaitable dans presque la totalité des ateliers de 2017. Le bilan des actions menées depuis 2018 a été rédigé sur la base d'une enquête spécifique lancée au printemps 2024 auprès de l'ensemble de la communauté.

# Nouvelles méthodes et nouvelles techniques de développement instrumentales

L'exercice de prospective précédent (2018-2022) avait permis de cibler des développements futurs d'intérêt manifeste pour la communauté SIC, de nouvelles méthodes/techniques analytiques, instrumentales, expérimentales et de modélisation. Forte des réflexions conduites dans cette prospective, la communauté a su fédérer ses forces, dont la pluridisciplinarité des recherches en SIC, au bénéfice de nos enjeux de recherche interdisciplinaires pour aborder avec succès un certain nombre de challenges porteurs de plus-values scientifiques indéniables. Sans être exhaustif, il convient de souligner au nombre des succès les plus patents :

- **la création de l'IR RéGEF** (cf. encadré ci-contre) en 2022, structurant au niveau national les moyens analytiques et expérimentaux géochimiques au sein du Réseau Géochimique et Expérimental Français. Une partie des moyens expérimentaux géochimiques SIC y sont notamment représentés au sein du plus récent axe BGE (BioGéochimie Expérimentale). En promouvant des échanges réguliers, cette structuration suscite une fructueuse percolation des expertises analytiques et expérimentales ;

- **la création de l'EquipEx+ TERRA FORMA** (PIA3 : 2021-2029 ; cf. encadré p.15) : lancé officiellement en 2022 et dédié i) au développement de capteurs innovants *in situ* de nouvelles génération (bas coûts, communicants, basse consommation, etc.) pour l'analyse haute fréquence d'éléments chimiques et molécules en traces ou de paramètres physiques et hydrologiques, ii) aux infrastructures de communication (IoT, LoRaWAN, etc.) et ce, avec l'implication du tiers secteur de la recherche et des sciences participatives. Ces nouveaux capteurs viennent compléter l'instrumentation déjà existante sur les sites de l'IR OZCAR et les futurs sites eLTER ;

- **la structuration du paysage de la donnée** (Data Terra, EaSyData, THEIA, Odatis) et la création de l'EquipEx+ Gaia DATA. Ces nouveaux 'outils' facilitateurs de la

**RéGEF**  
Réseau Géochimique & Expérimental Français



Le réseau BioGéochimie Expérimentale.  
Crédit image : réseau BGE.



## L'IR RéGEF: des instruments nationaux et des réseaux pour la quantification des processus en sciences de l'environnement

L'infrastructure de recherche RéGEF (Réseau Géochimique et Expérimental Français), créée en 2019, regroupe les instruments de mesure, d'imagerie et d'expérimentation, au service d'une recherche scientifique axée sur les transferts et transformations des éléments chimiques et de leurs combinaisons moléculaires. Composée de 10 instruments nationaux et de 12 réseaux, elle a pour objectifs de (i) maintenir l'innovation et le développement technologique au plus haut niveau, tout en (ii) organisant l'accès aux instruments et la production de données pour la communauté scientifique. Cette infrastructure de recherche se situe donc au carrefour entre (i) le développement et l'innovation de traceurs et méthodologies permettant d'identifier de nouveaux processus, ...

transition *sensu lato* vers les Big Data permet le stockage, le traitement et l'analyse des larges jeux de donnée indispensables pour la modélisation des dynamiques spatio-temporelles des SIC ;

- **la montée en puissance du recours à l'Intelligence Artificielle**, (IA), dans les modèles numériques (e.g. hydrologie, géophysique, etc.) ou l'analyse de données massives (e.g. données haute fréquences, séries de données satellites, etc.) ;

- **le renforcement des compétences, via la DT du CNRS-INSU**, dans le domaine de l'électronique embarquée, des protocoles de communication sans fils, et du développement d'applications mobiles pour faciliter les interactions entre capteurs, smartphones et les technologies de cloud computing ;

- **le recours accru aux outils spectroscopiques de pointe (grands instruments)** nécessaires à la résolution des questions de spéciation à l'échelle moléculaire grâce à l'amélioration du flux, de la cohérence des faisceaux délivrés par le synchrotron Européen (ESRF) à la suite de son upgrade et la qualité des faisceaux du synchrotron national SOLEIL ;

- le développement des technologies liées à **la modélisation analogique petite échelle (milli-, micro- et nano-échelle) et à la microfluidique** qui permet de développer des « réacteurs » modèles capables de tester des hypothèses mécanistiques, des simulations numériques et des mesures (géo)physiques sur des systèmes très contrôlés ou de développer des capteurs innovants ;

- **le couplage des techniques synchrotron** (spectroscopie XAS -haute résolution-, diffusion aux petits angles -SAXS-, mesures de diffraction haute énergie et analyse par fonction de distribution de paires) **et de cellules milli- et micro-fluidiques** pour suivre *in situ* par exemple, des changements d'états d'oxydation, de spéciation de contaminants métalliques ou des mécanismes de formation et altération minérales ;

(ii) leur utilisation par la communauté pour documenter les systèmes géologiques et environnementaux, et (iii) l'archivage des résultats, garantissant la pérennité et l'optimisation de l'information scientifique.

Au sein de l'IR RéGEF, la communauté SIC bénéficie d'un large éventail d'outils de mesure offerts par les différents réseaux pour la production de données de pointe pertinentes. Ces réseaux constituent aussi un cadre favorable pour les personnels techniques afin de maintenir leurs connaissances et leurs savoir-faire au plus haut niveau, voire de les renforcer. Voici deux exemples illustrant comment la structuration de l'infrastructure *via* RéGEF profite à la communauté SIC :

- Le **réseau Spectroscopie et Imagerie X (SPIX)** regroupe des instruments utilisant les rayons X comme source non destructive pour effectuer des microanalyses chimiques d'échantillons environnementaux par fluorescence, des caractérisations structurelles et texturales *via* tomographie/radiographie, ainsi que des analyses de spéciation à l'échelle atomique par spectroscopie d'absorption des RX (Instrument National FAME & FAME UHD). Les récents investissements majeurs obtenus par les plateformes SPIX, tels que les projets EQUIPEX+ MAGNIFIX et IMAGINE2, permettront de maintenir un niveau d'excellence et de relever les défis analytiques liés à la transition environnementale et énergétique, au cœur des préoccupations de la communauté SIC.

- Un autre réseau récent, le **réseau BioGéochimie Expérimentale (BGE)**, se distingue par son positionnement atypique, puisqu'il ne se concentre pas sur une famille unique d'instruments et d'équipements analytiques. Au contraire, le réseau BGE rassemble autour des problématiques interdisciplinaires des SIC une variété d'instruments et d'équipements permettant de réaliser des expériences en laboratoire (réacteurs cinétiques, bioréacteurs, chambres climatiques/anaérobies, autoclaves haute pression, etc.) ou *in situ*, ainsi que des techniques analytiques et de caractérisation sophistiquées (diffractomètre de rayons X, chromatographie liquide réfrigérée, cytomètre de flux, microscope numérique haute résolution, spectromètres FTIR, pyrolyse GC-MS, etc.). Le réseau BGE joue un rôle structurant pour la communauté SIC en améliorant la compréhension des interactions entre fluides, roches, sols et (micro-)organismes, cruciales pour le cycle des éléments et des molécules, y compris les polluants, dans les environnements de surface. Grâce au développement de couplages expérimentaux-analytiques innovants, le réseau BGE favorise la caractérisation multi-échelle des mécanismes réactionnels, ainsi que la détermination de paramètres globaux et l'intégration des processus biotiques et des réponses des (micro-)organismes à divers forçages.

Plus d'information : <https://www.regef.fr/>

- **la caractérisation moléculaire et le développement de méthodes de quantification de nanoplastiques** par Py-GC-MS dans des matrice environnementales ;

- **le développement de l'expérimentation en mésocosmes** *via* la construction de structures

dédiées (e.g. CEREGE, Géosciences Rennes, LIEC, etc.) qui viennent compléter des dispositifs existants (e.g. Ecotrons) ;

- **le développement et la diffusion des approches isotopiques élémentaires et moléculaires** pour tracer des sources et des

mécanismes, et leur couplage avec d'autres approches (spectroscopiques, chimiques, biologiques) :

- **la diffusion des approches omiques** issues depuis les domaines de la biodiversité et écotoxicologie vers une variété de domaines connexes, également en lien avec l'étude de l'Eco-exposome ;

- **le développement d'une méthodologie plus intégrative du suivi des processus de la Zone Critique**, à travers le couplage d'instruments et de traitements issus des différentes disciplines des SIC (e.g. géophysique, géochimie, microbiologie, etc.) ;

- l'utilisation de plus en plus fréquente de **drones**, à terre comme en mer, pour acquérir des observations spatialement distribuées, par exemple pour la photogrammétrie à l'origine des modèles numériques de terrain.

La communauté s'est également heurtée à quelques freins tels que :

- des verrous opérationnels liés à des **coûts d'exploitation élevés** de certaines structures d'expérimentation ;
- le manque de **support technique et RH** qui peuvent obérer la conduite d'expérimentations long termes.

Ainsi, la mise en synergie d'un parc analytique et expérimental conséquent et distribué (RéGEF) se heurte à des moyens alloués insuffisants pour atteindre les ambitions de cette IR inter-domaines à l'INSU (voir Faits marquants).



Prototype de la sonde multi-paramètres TERRA FORMA (conductivité, température, pression, turbidité, chlorophylle a, PAR et O<sub>2</sub> dissous). Crédit photo : Hubert Raguet.

## Le projet TERRA FORMA : observer et définir les interactions complexes qui relient les humains et leur environnement

TERRA FORMA est un projet d'équipement (Equipex+ du 3<sup>e</sup> Programme d'Investissement d'Avenir (PIA) de France 2030, 2021-2029) visant à renforcer les capacités d'observation des sites instrumentés de la Zone Critique et des socio-écosystèmes, en proposant une plateforme d'observation et une gamme de services aux Infrastructures de Recherche (IR).

Cette plateforme se compose d'une infrastructure de communication, d'un ensemble d'instruments, développés spécifiquement ou disponibles sur le marché, et d'une infrastructure humaine intégrant des équipes interdisciplinaires, associant notamment les acteurs du tiers secteur de la recherche. TERRA FORMA a pour objectif de soutenir les observatoires dans leur capacité à répondre à des questions de recherche

systemiques et exploratoires, tout en facilitant la gestion et la maintenance des capteurs et des données. TERRA FORMA cherche ainsi à définir une nouvelle chaîne de valeur, allant du capteur à la donnée acquise *in situ*, et à promouvoir une agilité instrumentale autour d'une architecture nationale cohérente et partagée.

La plateforme d'observation TERRA FORMA et ses services seront testés sur trois sites pilotes (Auradé, Guidel-Ploemeur, Lautaret) et seront déployés sur 10 sites supplémentaires d'ici 2029. Le projet s'articule autour du grand défi de l'habitabilité des territoires, décliné en quatre défis sociétaux : capital sol, paysage et biodiversité, pollution, et ressources en eau.

Plus d'information : <https://terra-forma-web.osug.fr/>

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

Les sciences des Surfaces et Interfaces Continentales sont, par définition, ancrées sur la compréhension des évolutions bio-physico-chimiques de la fine pellicule à la surface des continents, allant du haut de la canopée (e.g. basse atmosphère) jusqu'au substratum géologique. Les milieux étudiés sont variés (e.g. eau de surface, eau souterraine, air, sols, glaciers, zones côtières, zones agricoles, forêts, zones urbaines, etc.) au sein desquels se développent une multitude d'organismes vivants, dont les êtres humains. Les sciences des SIC sont intrinsèquement interdisciplinaires au sens où elles mobilisent de nombreuses disciplines comme la physique, l'hydrologie, la géologie, la géochimie, la biologie, l'écologie et développent des approches combinant l'observation et l'expérimentation, le développement instrumental et la modélisation.

Les sciences des SIC questionnent donc l'évolution de l'habitabilité sur Terre liée à « l'état » des milieux physiques et des milieux vivants étudiés. À l'ère de l'Anthropocène, les sciences des SIC contribuent donc à apporter des éléments de compréhension des évolutions passées et présentes pour mieux informer et anticiper les impacts futurs des changements globaux sur les territoires.

Communiquer sur les enjeux, les résultats et les perspectives de ces sciences complexes, mais néanmoins fondamentales pour le devenir du vivant, reste un enjeu majeur.

Lors de la dernière prospective, le concept de « Zone Critique » était d'ores et déjà présent dans la communauté, terme inspiré par la communauté anglo-saxonne, exprimant la « fragilité » de cette fine enveloppe, « critique » pour les conditions d'habitabilité du vivant. Depuis, ce terme s'est peu à peu invité dans d'autres domaines disciplinaires (e.g. philosophie, histoire, art) mais aussi dans d'autres sphères médiatiques ou associatives. Les travaux de Bruno Latour et son implication dans les travaux de l'IR OZCAR, ainsi que le récent ouvrage de Jérôme Gaillardet (« La Terre habitable ou l'épopée de la Zone Critique », édition La Découverte), ont largement contribué aux ouvertures nécessaires pour mobiliser les

expertises scientifiques afin de i) mettre en place une démarche holistique pour mieux connaître cet objet d'étude et ii) se rapprocher du « grand public », et ainsi partager les connaissances et les enjeux aux conditions d'habitabilité de la Terre. Le terme de socio-écosystème est préféré par certains car il est plus explicite sur l'intégration du vivant dont les actions des humains dans cette Zone Critique. Ces concepts sont maintenant bien compris et leur usage ne fait pas obstacle à la communication au sein et en dehors de notre communauté.

Nous sommes aujourd'hui conscients que le travail conjoint d'acteurs d'origines très différentes (milieu académique, décideurs, agents de collectivités et d'entreprises, acteurs associatifs, citoyens mais aussi artistes) est indispensable pour faire face aux défis que les changements globaux font peser sur les territoires. Dans ce contexte, la recherche a un rôle central à jouer auprès des sociétés et des territoires, pour permettre de comprendre les phénomènes en cours et à venir, pour contribuer à définir comment réduire les impacts et comment s'adapter de façon équitable et inclusive à ces situations inédites. Néanmoins, ces recherches seront d'autant plus utiles si les résultats sont partagés avec les acteurs des territoires et dans le quotidien des citoyens.

Depuis la dernière prospective, notons que la communauté SIC a progressé pour répondre à ces objectifs, grâce à des projets d'envergures variées allant de projets très ciblés aux échelles locales, à des projets structurant au niveau national, comme les PEPR (e.g. One Water, cf. encadré ci-contre; TRACCS; FairCarbon, cf. encadré p.18; TRANSFORM; SoluBioD, cf. encadré p.19). La coconstruction associant les sciences des SIC avec les sciences humaines et sociales reste néanmoins hétérogène d'un projet à l'autre ainsi que d'un thème à l'autre (cf. section « Coconstruction des recherches SIC avec les SHS » p. 34) mais cette interdisciplinarité « radicale », décrite par L. Lestel lors du colloque, semble acquise auprès de la communauté pour répondre aux enjeux. Si cette interdisciplinarité est désormais encouragée voire « acceptée », l'enjeu réside aujourd'hui dans la mise en œuvre des sciences transdisciplinaires, coconstruites avec les acteurs des territoires, afin de faciliter l'appropriation des résultats et d'engager des solutions durables (cf. section « Événements Extrêmes — Aléas et risque » p. 32). À ces fins, les sciences transdisciplinaires nécessitent au préalable de renforcer la médiation scientifique, via des approches complémentaires bien adaptées au territoire.

Communiquer « autrement » sur les



## Le PEPR OneWater – Eau bien commun : un programme national de recherche et d’innovation sur l’eau



Échantillonnage d’eau naturelle. Crédit photo : Cyril-FRESILLON, CEREEP, CNRS Photothèque

Avec le changement global, les pressions environnementales et anthropiques sur les ressources en eau douce continentale sont exacerbées et deviennent un défi majeur pour nos sociétés au XXI<sup>e</sup> siècle. OneWater — Eau Bien Commun est un programme national de recherche exploratoire (2022-2032) visant à développer les connaissances pour changer de paradigme et réhabiliter l’eau comme commun. Co-piloté par le CNRS, le BRGM et INRAe, il doit contribuer à accélérer les transitions et mesurer les impacts des changements globaux sur les socio-écosystèmes, en France métropolitaine et ultra-marine.

Élaboré par des chercheurs issus de disciplines variées (hydrologues, hydroclimatologues, écologues, écotoxicologues, chimistes, géographes, socio-économistes, juristes, anthropologues...) au bénéfice de l’ensemble des communautés, ce programme vise à répondre à des enjeux de recherche, des enjeux environnementaux et de sociétés. OneWater entend ainsi répondre à 6 grands défis scientifiques interdisciplinaires concernant particulièrement la communauté SIC. En s’appuyant sur les dispositifs

d’observation (AnaEE, OZCAR, RZA, OHM...), il s’agit (1) de mieux anticiper l’évolution de la disponibilité des ressources dans les territoires ; (2) d’envisager l’empreinte eau tant dans ses dimensions quantitatives que qualitatives ; (3) de mobiliser l’eau comme sentinelle de la bonne santé des humains et des milieux, de la source à la mer ; (4) de proposer des solutions d’adaptation pour accompagner (5) les transitions socio-écologiques nécessaires pour une eau comme commun, en s’appuyant sur (6) des données et des connaissances partagées.

Pour relever ces défis, les 13 partenaires académiques du programme contribuent aux 8 projets dits « ciblés » ouverts à tous les scientifiques, tout comme les appels à projets et autres actions du programme pour répondre ensemble à ses défis scientifiques.

Ouvert à toutes et tous, OneWater a vocation à fédérer et accompagner les scientifiques et les parties prenantes pour accompagner les transformations et apporter des réponses aux enjeux actuels et futurs de l’eau au bénéfice de tous.

Plus d’information : <https://www.onewater.fr/fr>



Site de Faiderbia Flux dans la réserve agro-sylvo-pastoral de Niakhar (Sénégal). Crédit photo: Patricia Garnier.

## Le PEPR FairCarboN : contribution des écosystèmes continentaux à l'atténuation du changement climatique

La Prospective menée en 2017 a favorisé de nombreuses rencontres et discussions scientifiques autour du cycle du carbone dans les écosystèmes continentaux. Cette thématique mobilise largement la communauté SIC, avec des réflexions sur la dynamique du carbone présentes dans presque tous les chapitres de la Prospective 2018-2022. Ces échanges ont constitué un terreau particulièrement fertile, permettant de monter rapidement (en 4 à 6 mois) le programme de recherche intégrateur sur le carbone dans les écosystèmes continentaux, FairCarboN, qui a été financé dans le cadre de la première vague de l'Appel à Programmes PEPR. Un programme de recherche ambitieux sur ce sujet se justifiait pleinement, car bien que le rôle crucial des écosystèmes continentaux dans l'atteinte de la neutralité carbone soit établi, de nombreuses questions restent en suspens. Il est en effet nécessaire de déterminer avec précision la contribution potentielle et souhaitable des écosystèmes naturels, semi-naturels et gérés. Des incertitudes concernent notamment la capacité de ces écosystèmes à stocker le carbone de manière

durable, leur résilience face aux changements globaux, ainsi que les stratégies de gestion à privilégier pour maximiser leur rôle dans l'atténuation du changement climatique.

Le programme PEPR FairCarboN (<https://www.pepr-faircarbon.fr>) repose sur 16 projets. Cinq « projets ciblés » viennent en soutien à des dynamiques collectives de production de données (notamment Infrastructures de Recherche) et de modélisation. Par ailleurs, 2 AAP ont permis de financer 11 projets mobilisant de larges consortia sur 4 thématiques : (1) flux de carbone le long du continuum Terre-Mer, (2) couplages entre cycles, (3) production et mobilisation de la biomasse, (4) aspects économiques et sociaux.

FairCarboN mobilise actuellement plus de 70 Unités en France métropolitaine, dans les outremer et en collaboration avec des équipes des pays du Sud. Le programme monte en puissance avec des productions de résultats et des actions de structuration qui vont s'amplifier dans les prochaines années.

Plus d'information : <https://www.pepr-faircarbon.fr/>

sciences en cours ou les résultats acquis permet d'atteindre des publics et des territoires différents. De nombreuses initiatives ont vu le jour pour introduire le « sensible » à travers des actions Art-Science (poésies, spectacles, expositions (cf. encadré p. 21). À travers les émotions soulevées lors de ces différentes actions, le public est peut-être plus à même d'imaginer voire proposer des solutions d'adaptation. En retour, les acteurs académiques s'ouvrent à de nouvelles postures portant ainsi un autre regard sur leur objet d'étude.

Si la communauté SIC semble s'être engagée plus significativement dans sa diffusion de résultats auprès des territoires, les communications SIC au sein de la sphère académique, notamment au sein de l'INSU, restent cependant en retrait. En effet, le nombre des « faits scientifiques » remontés par les autres communautés (e.g. AA ou OA) est bien supérieur à celui de ceux remontés par la communauté SIC. Les travaux sur les processus, en

particulier les processus abiotiques, pourraient être, par exemple mieux mis en valeur.

L'intérêt de ces « faits scientifiques » est-il questionné par la communauté ou est-ce une question de temps, de moyens ou de savoir-faire ? Concernant ce dernier point, les formations média-training, encouragées par le CNRS et l'INSU en particulier, manquent encore de volontaires, alors que les retours des participants sont tous très positifs. Parallèlement à cet état de fait, la communication via les réseaux sociaux, tout en restant très hétérogènes d'un scientifique à l'autre, est bien présente, notamment sur les enjeux environnementaux (e.g. sécheresse, PFAS, pesticides, ressource en eau et bassines). Pour ces derniers thèmes, on note malheureusement une « radicalisation » dans les prises à partie, souvent violentes, mettant en grande difficulté les scientifiques concernés.

Finalement, on mesure l'importance de la communication de nos recherches vers de nombreuses sphères (e.g. académiques, acteurs des territoires, décideurs, grand public). Ces communications, dès lors que la cible est bien identifiée, doivent pouvoir s'appuyer sur des supports distincts, avec lesquels les scientifiques se sentent confortables. L'intégration de professionnels de la communication dans les équipes de recherche est également un enjeu majeur ; néanmoins ces personnels doivent pouvoir être au plus près des scientifiques afin d'élaborer ensemble le plan de communication le plus adapté. L'affectation de ces personnels au sein des OSU est certainement une bonne voie d'entrée. Il faut néanmoins rester vigilants à ce que ces personnels puissent assurer leur mission en relation avec plusieurs unités et sites sans surcharge de travail.

## Le PEPR SoluBioD : un programme pour promouvoir les Solutions fondées sur la Nature

La crise climatique et le déclin de la biodiversité obligent nos sociétés à se réinventer. Les Solutions fondées sur la Nature (SfN) sont des approches de protection, restauration ou gestion des écosystèmes permettant de relever efficacement différents défis sociétaux et ayant des impacts positifs à la fois sur le plan social, environnemental, économique et sur la biodiversité. Basées sur le fonctionnement des écosystèmes, les SfN peuvent être complémentaires voire se substituer aux solutions d'ingénierie technologique.

La mise en place des SfN permet, grâce à l'amélioration de la santé des socio-écosystèmes, à la fois une meilleure atténuation et adaptation au changement climatique voire l'anticipation des risques naturels. Les SfN rendent de nombreux services écosystémiques améliorant ainsi le capital naturel des territoires. Elles suscitent un intérêt grandissant de la part de nombreux acteurs dont les collectivités locales mais aussi certaines entreprises. La France mène des recherches de haut niveau sur la biodiversité et sur les effets du changement climatique mais relever les défis liés au déploiement

des SfN implique un effort de structuration et d'animation à l'échelle nationale. Le programme national de recherche sur les Solutions fondées sur la Nature souhaite ainsi favoriser le développement d'une recherche innovante et ambitieuse sur les SfN, en tant qu'approches systémiques.

Ce programme est financé dans le cadre du plan d'investissement France 2030 à hauteur de 44,2 millions d'euros sur une période de 9 ans (2023-2032). Il est mené en étroite collaboration avec les communautés de la recherche publique et un grand nombre d'acteurs de la société. Il s'appuie sur :

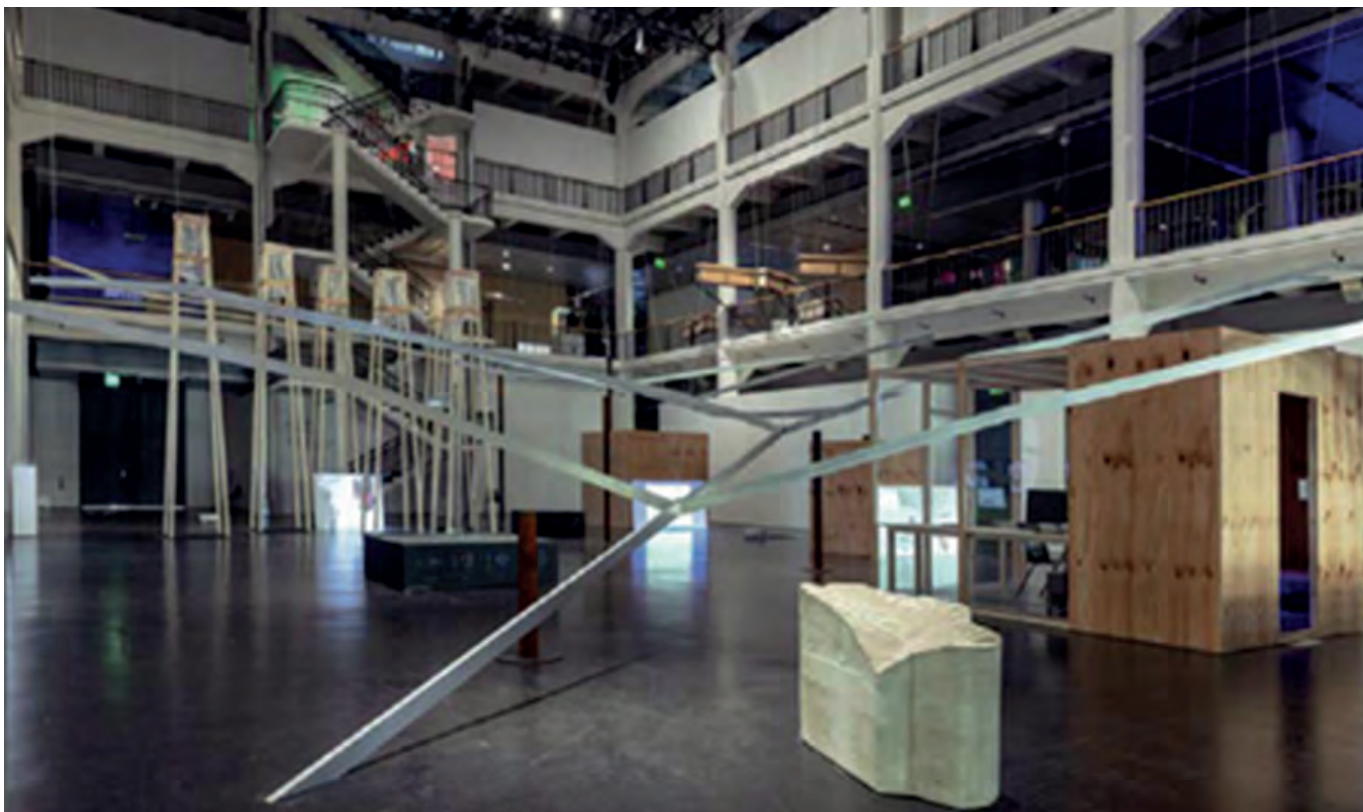
- Sept projets stratégiques, prédéfinis en amont pour structurer et renforcer la communauté scientifique nationale.
- Des actions de pilotage et de gouvernance dont l'animation de groupes de travail thématiques sur les grands enjeux scientifiques du programme, l'organisation d'événements et d'animations autour de la recherche sur les SfN.
- Cinq appels à projets ouverts.

Plus d'information : <https://www.pepr-solubiod.fr/>



Photographie aérienne de bâtiments végétalisés. Crédit photo: Wang phototèque.

“**Les Solutions fondées sur la Nature (SfN) sont des approches de protection, restauration ou gestion des écosystèmes**”



Maquette de béton d'argile coulé dans la masse et réalisé avec la terre provenant de l'observatoire du Strengbach. Crédit photo: ZKM Peter Mueller.

## Les Arts et les Sciences pour explorer le concept de Zone Critique

Depuis la dernière prospective SIC, la notion de Zone Critique s'est étendue au-delà des géosciences pour s'imposer dans des disciplines aussi variées que les sciences philosophiques, artistiques, politiques, ainsi que dans les sphères médiatiques, associatives et même parfois auprès du grand public. Un exemple notable de cette « appropriation » au-delà des sciences est l'exposition artistique « Critical Zone: Observatories for Earthly Politics », qui s'est tenue au musée des arts et des médias de Karlsruhe (Zentrum für Kunst und Medien, Karlsruhe, Allemagne. <https://zkm.de>) entre mai 2020 et janvier 2022. Conçue par Bruno Latour et Peter Weibel, cette exposition a illustré cette interdisciplinarité. Un espace de près de 10 000 m<sup>2</sup> était dédié à l'observatoire du bassin versant du Strengbach (SNO OHGE), un site où les écosystèmes forestiers de moyenne montagne sont étudiés depuis plus de 35 ans. Cet espace a vu le jour grâce à des échanges en 2018 entre Bruno Latour, des scientifiques et les habitants du site de l'OHGE. Il a également bénéficié de plus de deux ans de collaboration entre le SNO et l'équipe SOC (Société d'Object Cartographique SOC; Alexandra Arènes et Soheil Hajmirbaba. <http://s-o-c.fr>).

L'exposition combinait objets, vidéos, sons et illustrations pour présenter les outils et méthodes de l'observation scientifique. Les cartographies réalisées par Alexandra Arènes (SOC) ont offert une représentation esthétique et originale de cette approche multidisciplinaire. Ce dialogue entre l'art et la science a joué un rôle majeur dans la sensibilisation du grand public à la Zone Critique, une zone fragile, limitée et fortement anthropisée de la Terre habitable.

L'exposition du ZKM (visite virtuelle: <https://critical-zones.zkm.de/#/>; festival d'ouverture: <https://zkm.de/en/critical-zones-streamingfestival>) continue d'avoir un impact grâce à sa visite virtuelle, une tournée internationale (notamment en Asie en 2022 et 2023) et son catalogue primé en 2020 et 2021, comprenant plusieurs articles consacrés aux observatoires français. Dans un futur proche, de nouveaux îlots sont en cours de conception pour l'exposition « La Pellicule Habitable », prévue en 2025 au Palais de la Découverte, dont deux seront dédiés aux SNO OHGE et H+.

Au-delà de la transmission au grand public, ce rapprochement entre l'art et la science ouvre de nouvelles perspectives de réflexion sur les enjeux des sciences de l'environnement.

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

Dans la prospective 2018-2022, un des enjeux scientifiques prioritaires a été de « fournir une approche intégrative des écosystèmes à des échelles spatiales et temporelles différentes dans un contexte de changements environnementaux (passé, présent, futur) ». Il était proposé que cette approche intégrée s'appuie sur la combinaison de données et d'expérimentations *in situ*, de données satellitaires hautes résolutions et de la modélisation. L'objectif était d'améliorer notre compréhension du fonctionnement des SIC, de prévoir ses évolutions possibles et fournir des éléments pour l'aide à la décision. Concrètement, les objectifs suivants avaient été définis en 2017 : i) Faire évoluer les stratégies d'observation, notamment en lien avec les nouvelles missions spatiales, et renforcer les expertises scientifiques en s'ouvrant vers d'autres communautés scientifiques pour développer des outils innovants tant pour l'observation que pour l'analyse des données et leur valorisation, que pour la modélisation des processus environnementaux et de leurs couplages. ii) Se structurer autour de l'approche intégrée pour être visible à l'international en s'appuyant sur les plateformes et portails déjà existants et en les renforçant. 3) Afin de répondre aux grandes questions scientifiques posées par les changements globaux, la communauté doit penser la modélisation comme un support d'intégration des connaissances et d'interdisciplinarité et développer des plateformes de modélisation ouvertes et évolutives pour la recherche mais aussi visant à être opérationnelles pour le monde socio-économique.

Le constat en 2024 est celui d'une avancée sur ces objectifs, et que la communauté SIC a gagné en visibilité à l'international autour de l'approche intégrée. L'infrastructure de Recherche OZCAR ainsi qu'ILICO sont aujourd'hui des piliers de la communauté SIC proposant une vision intégrée partagée de la Zone Critique et rassemblant les observatoires des écosystèmes tempérés, tropicaux et urbains, de la cryosphère, du compartiment régolithique, et des environnements côtiers. Son prolongement européen à travers le montage d'eLTER (cf. encadré p. 23), d'une part et l'IR JERICO, d'autre part, donne en perspective l'intégration des écosystèmes et a ouvert le rapprochement des SNO et des Zones Ateliers. Des progrès ont été faits pour intégrer la problématique environnement/santé (One Health, cf. encadré p. 26), notamment dans les suivis et la recherche de proxys sanitaires. Impulsé par les développements en IA, la

communauté SIC s'est rapprochée des mathématiques appliquées, et de la science des données afin de développer des outils innovants en traitement de données d'observation et en modélisation *via* les divers PEPR (e.g. Mathvive). Les acteurs de la recherche en SIC constatent cependant le besoin important de moyens humains pour la gestion des données et des codes de calculs, leur accessibilité et leur traitement, pour lesquels de nouveaux métiers émergent. La communauté SIC a considérablement développé ses capacités d'analyse des nouvelles données satellitaires et des SNO (IR Data Terra, interopérabilité, programme TOSCA). Une démarche qualité, certifiant la fiabilité de la mesure, la traçabilité et la bancarisation des données est en cours au sein de eLTER et ILICO. Des progrès ont été faits sur les manières de coupler différents modèles ; cependant, une plateforme d'échange inter-institutions autour des méthodologies,

modèles et données mobilisées dans le cadre de l'approche intégrée reste à établir. On note également le développement de l'interdisciplinarité et les collaborations entre réseaux et des liens sciences-société dans les observatoires. Les sciences des SIC s'ouvrent également de plus en plus à l'histoire environnementale, l'anthropologie, la sociologie, la philosophie et aux arts permettant davantage de réflexivité dans nos pratiques.



Les missions de l'infrastructure de recherche eLTER. Crédit image : eLTER.



## eLTER : une infrastructure de recherche au service de l'étude de la zone critique et des socio-écosystèmes

En 2018, l'Europe inscrivait l'initiative eLTER (pour *European Long-Term Ecosystem Research*) sur sa feuille de route des Infrastructures de Recherche (IR). Cette étape marquait une double reconnaissance : (i) celle de près de 20 années d'inlassables développements pour constituer un réseau pan-européen de sites dédiés à l'étude de la Zone Critique et des socio-écosystèmes, (ii) celle de la dimension systémique portée par eLTER, sans équivalent dans le paysage des IR européennes en environnement. Le travail préparatoire à la phase opérationnelle est mené depuis 2020 dans le cadre du projet eLTER PPP (*Preparatory Phase Project*), qui définit l'ensemble des éléments de pilotage de la future IR sur les plans scientifiques, financiers et juridiques.

La France s'est résolument engagée dans eLTER en s'appuyant naturellement sur la communauté SIC, regroupée au sein des IR OZCAR et RZA. Nos outils et infrastructures relevant du projet eLTER figurent parmi les plus avancés en Europe, et la communauté SIC doit trouver collectivement l'articulation la plus efficace entre ces dispositifs existants et notre participation à eLTER via un ensemble de sites labellisés. Il faut bien entendu veiller à ce que le portage de quelques sites au niveau européen n'obscurcisse pas l'avenir des autres. Nos expertises et nos recherches en lien avec les

grandes thématiques eLTER sont de rang international, et elles ont naturellement vocation à s'incarner dans un centre thématique hébergé tout ou partie en France. Les réflexions en cours sur cette question doivent associer étroitement les programmes d'investissement d'avenir concernés par eLTER. Au-delà des difficultés techniques et politiques inhérentes à la mise en place d'une IR européenne, le projet eLTER doit avant tout être perçu comme une chance de relever encore plus efficacement les défis d'une science intégrée de la zone habitée de notre planète. Parmi ces défis, le décloisonnement disciplinaire, l'innovation en métrologie environnementale, la consolidation des liens Science-Société ont été clairement mis en avant dans ces perspectives sur le futur de nos observatoires (cf. chapitre « Observons les observatoires »). Ces grandes orientations s'alignent parfaitement avec celles d'eLTER, ce qui positionne notre communauté SIC pour jouer un rôle majeur dans la construction d'un espace européen dédié à la recherche et à l'observation des socio-écosystèmes ainsi que de la Zone Critique.

Plus d'information : <https://elter-ri.eu/>

## Cycles longs – cycles courts

La Zone Critique, cette fine pellicule à la surface de l'écorce terrestre où vivent les humains, contient des ressources naturelles, marines et terrestres, essentielles qui se sont constituées sur des échelles de temps géologiques longues. De plus, elle est impactée par l'activité humaine sur des périodes courtes, allant de siècles à millénaires. Elle peut aussi évoluer très rapidement sous l'effet d'évènements extrêmes dus aux forçages climatiques, anthropiques, biologiques et telluriques. Comprendre et prédire cette dynamique complexe, mêlant différentes échelles de temps nécessite plus d'interactions entre les communautés, ainsi que l'intégration des couplages avec le vivant. Étudier la dynamique passée de la Zone Critique sur des échelles séculaires et millénaires, et son intégration dans une dynamique long terme, afin de prédire son évolution future face au changement global, faisait partie des priorités affichées par la prospective 2018-2022.

L'intérêt de la profondeur temporelle passée pour appréhender la dynamique des processus régissant l'évolution actuelle et passée des SIC, aujourd'hui évident, était une ambition affichée de la précédente prospective. Plusieurs projets dans la communauté géomorphologique française se sont attachés à mieux caractériser les impacts des forçages à différentes échelles de temps. Notamment, plusieurs programmes nationaux (ANR, EC2CO, MITI) intègrent depuis 10 ans dans leurs appels d'offres les reconstitutions paléo-environnementales comme outil de mise en perspective du présent et de comparaison pour affiner les modèles prédictifs axés sur les SIC. En parallèle, le développement de nouveaux marqueurs paléo-environnementaux quantitatifs et la diversification des méthodes de datation sont encouragés.

Des projets comme les ANR TopoExtreme, Palavas, Pantera ou Wiva ou l'ERC Feasible ont donné une part importante à l'étude des liens entre les échelles de temps et l'analyse comparée des processus de surface actifs aujourd'hui et sur le long-terme, ceci afin de mieux comprendre les flux de matière au travers des reliefs et de la Zone Critique, et leurs liens avec les grands cycles, dont celui du carbone. Des approches mêlant une analyse géochimique des processus actuels avec des enregistrements

sédimentaires sur plusieurs centaines de millénaires, sont au cœur des projets Pantera et Palavas. Les projets TopoExtreme et Feasible se sont organisés explicitement autour de l'étude des évènements extrêmes (crues, glissements de terrain, séismes) et leur impact sur l'évolution du relief et les processus d'érosion.

Le cas particulier de l'érosion des côtes rocheuses est aussi un enjeu mondialement identifié, mais le lien entre le retrait des côtes sur les courtes, méso- et longues échelles de temps reste inconnu, notamment car nous ne disposons pas de méthodes pour quantifier l'érosion côtière long-terme dans les zones de retrait lent. La mesure des isotopes cosmogéniques dans les colluvions de bas de falaise semble une méthode prometteuse pour combler ce manque.

À travers le réseau OZCAR, la communauté française fait un travail d'observation poussée des propriétés physico-chimiques de bassins versants dans des contextes variés. Les approches des mesures sont aussi très variées. L'un des travaux en cours a pour objet de replacer l'ensemble de ces bassins dans un continuum via l'analyse des taux de dénudation long-terme (millénaire) par les isotopes cosmogéniques. La communauté scientifique française dispose toujours d'un accès privilégié à des outils de géochronologie via ses plateformes

nationales (LMC14, LN2C, etc.). Une structuration nationale de ces outils dans le cadre de l'IR RéGEF est maintenant réalisée et apporte une claire plus-value (synergie au niveau national, réflexion sur la gestion des données, etc.). Comme cela avait déjà été noté lors de la prospective précédente, ces instruments sont très sollicités et commencent à accuser leur âge. Une jouvence et/ou évolution est à anticiper à l'horizon 2030, avec un soutien institutionnel qui devrait être clairement identifié.

Des codes de modélisation à différentes échelles des processus géomorphologiques sont développés activement au sein de la communauté SIC française (e.g. CIDRE, EROS) et proposent des fonctionnalités uniques dans le panorama mondial des Landscape Evolution Models, comme le suivi des traceurs géochimiques ou la prise en compte réaliste de l'hydrologie. Par exemple, pour mieux quantifier les paléo-taux de dénudation long-terme à partir des concentrations en isotopes cosmogéniques dans les archives sédimentaires, des modèles d'évolution des paysages long-termes ont incorporé l'évolution de ces concentrations dans des grains sédimentaires, permettant d'explorer le lien entre stochasticité de leur transport sur la méso-échelle temporelle dans un bassin versant et le signal cosmonucléide en sortie.

On peut noter que des formations doctorales et thématiques ont été proposées ces dernières années sur les outils clés (e.g. « Nucléides cosmogéniques et leurs applications

en Science de la Terre » par le LN2C (CEREGE) et « Point clouds and change detection » (Géosciences Rennes), dont certaines vont devenir récurrentes. En complément de

ces aspects méthodologiques, des écoles thématiques sur les emboîtements d'échelles seraient à proposer.

## Liens biotique – abiotique

Afin de répondre aux enjeux de gestion durable des écosystèmes, il est apparu, lors de la précédente prospective SIC, la nécessité de mieux intégrer la diversité biologique et des cycles de vie dans l'analyse des bilans énergétiques et hydriques des surfaces et interfaces continentales, ainsi que dans l'étude des processus de transformation et de transport de la matière dans le continuum biotique-abiotique. La transition de la pluridisciplinarité à l'interdisciplinarité s'est intensifiée, intégrant des disciplines telles que la géochimie, la microbiologie, l'hydrologie, la pédologie, la minéralogie, la toxicologie, la santé et les sciences sociales. Cette dynamique a été notamment favorisée par les appels à projets de la MITI et la création de l'action thématique DYCOVI du programme national d'EC2CO (p. 142).

### **Vers une meilleure compréhension des interactions écologiques : traits fonctionnels, biomasse et perturbations hydro-climatiques.**

Le développement des bases de données globales sur les traits fonctionnels des espèces, l'utilisation accrue de la télédétection et de l'imagerie pour le suivi des traits fonctionnels à grande échelle (e.g. *via* le pôle Theia et EQUIPEX+ GAIA DATA), ainsi que les modèles prédictifs intégrant les régimes de perturbation dans les prévisions climatiques et écologiques, ont permis d'avancer sur la compréhension des interactions entre traits fonctionnels, biomasse et climat à différentes échelles en réponse aux changements climatiques, en s'appuyant notamment sur les SNO (OZCAR). Cela permet une reconnaissance accrue des rôles des perturbations (e.g. incendies, tempêtes, élévation de température, inondations, sécheresses, etc.) dans les dynamiques écosystémiques. Les freins actuels concernent notamment l'hétérogénéité des méthodes de collecte de données, le manque de données pour certaines régions et groupes taxonomiques, ainsi que la complexité des interactions entre variables écologiques et climatiques,

rendant délicate la prédiction des perturbations extrêmes à long terme.

### **Vers l'intégration des interactions biotiques et des dynamiques physico-chimiques dans les écosystèmes continentaux.**

L'intégration des interactions et des contributions biotiques et abiotiques dans le transport de matière et de solutés pour la modélisation des écosystèmes continentaux représente un défi majeur. Ce défi a été relevé grâce au développement de modèles, assistés d'outils tels que le « machine learning », et d'études de cas qui intègrent la complexité des interactions multi-échelles et multi-espèces. Ces travaux, facilités par des approches intégrées (e.g. données inter-SNO et EQUIPEX+ TERRA FORMA) permettant une approche plus fine et des résolutions inédites pour cerner les interactions entre systèmes biotiques et abiotiques, soulignent les signatures cruciales des organismes dans la structuration des milieux, de l'interface minérale jusqu'à l'échelle planétaire, et les effets réciproques entre organismes et environnement, régissant l'habitabilité de la Terre. Cependant, ces avancées mettent également en lumière la nécessité de données empiriques robustes pour

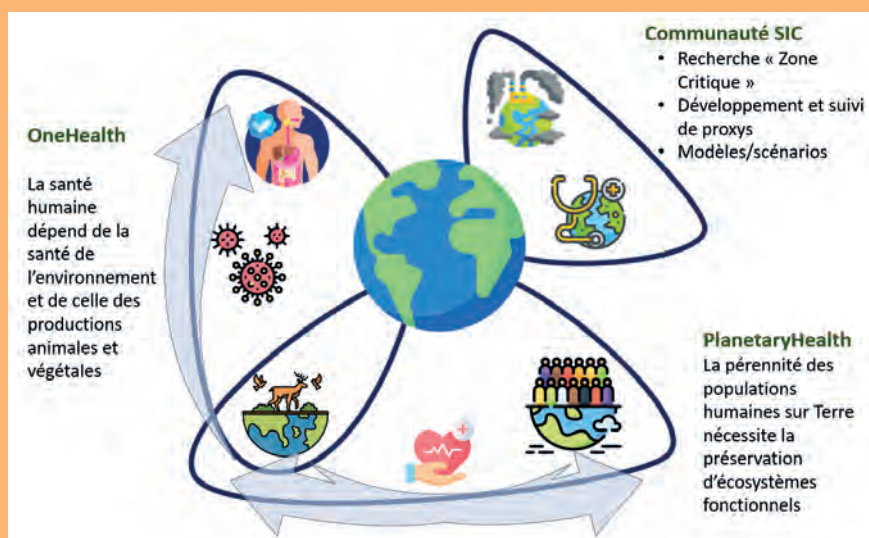
paramétrer et valider ces modèles. Les freins majeurs concernent le manque de données sur les effets indirects des organismes sur les cycles élémentaires, ce qui limite la précision des modèles, et la complexité des interactions biotiques et abiotiques à différentes échelles spatio-temporelles.

### **Vers une meilleure compréhension des mécanismes et de la temporalité du transfert des contaminants entre les compartiments de la Zone Critique.**

De nouvelles approches d'observation, intégrant de plus en plus l'électrochimie, l'isotopie et la spéciation, se sont développées, permettant de prendre en compte cette temporalité. Cela a été renforcé par des recrutements de C/EC spécialisés en isotopie et spéciation dans les UMR SIC. Une meilleure compréhension des processus a aussi été permise par des avancées techniques en termes de limites de détection et de caractérisation des éléments (e.g. EQUIPEX+ MAGNIFIX, IMAGINE2), le développement de capteurs (e.g. EQUIPEX+ TERRA FORMA) ainsi que les nouveaux outils d'imagerie synchrotron appliqués aux risques environnementaux qui ont connu un



Les concepts OneHealth et EcoHealth pour la recherche en SIC. Crédit image: Simon Devin.



## One Health et Eco-Health : des concepts porteurs d'interdisciplinarité pour la communauté SIC

Le concept de « One Health », proposé en 2008 par plusieurs organismes internationaux, postule que la santé des êtres humains, de l'environnement et des animaux est intrinsèquement liée. Cette approche vise à mieux comprendre les enjeux de santé publique, en mettant l'accent sur la prévention des zoonoses et des maladies émergentes. Les concepts d'« Eco-Health » et de « Planetary Health » élargissent cette perspective en intégrant les « facteurs environnementaux », tels que le changement climatique, les événements extrêmes, la biodiversité et le devenir des polluants. Ils reconnaissent que des écosystèmes en bonne santé sont essentiels pour garantir la durabilité des populations humaines. Ces domaines de recherche nécessitent une collaboration inter- et transdisciplinaire pour comprendre les relations entre l'état de conservation des écosystèmes et l'habitabilité des populations humaines. Il

s'agit également de considérer différentes échelles spatio-temporelles pour atténuer les impacts écologiques et climatiques sur la santé. La communauté SIC s'appuie de plus en plus sur ces concepts, et peut encore valoriser son rôle dans la résolution des problèmes de santé publique, notamment en assurant un suivi à long terme de proxys pertinents en matière de risques sanitaires dans les différentes matrices et compartiments de la Zone Critique. L'une des forces de la communauté SIC réside dans le développement de modèles et de scénarios d'exposition humaine, contribuant ainsi à éclairer les politiques publiques et à promouvoir des stratégies de prévention plus efficaces.

essor significatif. L'IR RéGEF a joué un rôle extrêmement positif pour une meilleure visibilité et maîtrise des outils disponibles au sein de la communauté, et la démocratisation des outils de spéciation géochimique a été facilitée par une offre croissante de formations (e.g. ASTER'X, école thématique sur la spectroscopie d'absorption X et les techniques d'imagerie X par synchrotron). Le développement significatif d'outils omiques a aussi permis des avancées remarquables pour l'étude des flux de matière et de contaminants entre les compartiments de la Zone Critique et des réseaux comme Ecotoxocomic et Recotox ont joué un rôle crucial.

### Vers une meilleure évaluation des risques associés aux polluants émergents et aux effets multi-stress.

Les récents progrès dans l'évaluation des risques liés aux polluants émergents ont permis une caractérisation plus précise de l'exposition et des dangers associés aux contaminants, même à de très faibles concentrations proches des niveaux géochimiques naturels, malgré la complexité des matrices environnementales. La structuration à travers des réseaux comme les GDR Polymer et Océan, RT TAEMA ainsi que l'avancée en chimie analytique pour le criblage et la quantification multi-résidus, ont favorisé une meilleure prise en compte des polluants émergents. L'émergence de concepts d'éco-exposome, d'habitabilité, de One Health dans notre communauté a encouragé une approche proactive des effets « cocktails », nécessitant le développement d'approches expérimentales intégratives (e.g. mésocosmes, riverlab, ecotron, etc.) pour étudier l'exposome chimique, biologique et d'autres stress physiques dans un contexte de changement climatique et de transition environnementale. Des défis persistent cependant, quant à l'identification d'indicateurs fiables, à l'amélioration des méthodes de rétro-observation, de modélisation et d'expérimentation.

# La matière organique dans tous ses états

Lors de l'atelier «La matière organique dans tous ses états» de la prospective SIC précédente, la communauté avait une analyse SWOT sur les recherches sur les matières organiques. Parmi les forces, il avait été noté, en particulier, la très bonne structuration de la communauté répartie au sein d'une diversité d'universités et d'organismes de Recherche et le fait que la thématique avait le vent en poupe, portée par des questions d'actualité relatives à l'atténuation du changement climatique, la santé des sols et les pollutions. Ces forces se sont rapidement transformées en opportunité car cette structuration déjà significative et le fait que nos travaux portent sur des enjeux sociétaux bien identifiés ont probablement été deux atouts majeurs permettant au programme exploratoire FairCarboN (cf. encadré p. 18) d'être retenu lors de la première vague de l'Appel à Programmes PEPR.

Même si le champ thématique de FairCarboN ne recouvre que partiellement le périmètre de l'atelier «la matière organique dans tous ses états» de la précédente prospective, sa mise en œuvre permet d'éloigner quelques menaces et permettra surtout de remédier à un certain nombre de faiblesses identifiées. Une faiblesse identifiée est la multiplicité des sources de données sur les stocks de carbone qui empêchait la communauté d'avoir une vision complète et cohérente de l'existant. ALAMOD (projet ciblé de FairCarboN) va mettre en place une base de données sur les évolutions des stocks de carbone (sol et biomasse) permettant d'évaluer les modèles numériques simulant les évolutions de stock de carbone dans différents écosystèmes et

à différentes échelles. Ce travail, conduit en collaboration avec l'Equipex+ Gaia Data, permettra de mettre à disposition une base de données harmonisées regroupant des données issues de plusieurs dispositifs et IR (e.g. AnaEE, ICOS, IN-SYLVA, RMQS, RENECOFOR, etc.). Il nourrira également un dialogue entre différents groupes de modélisation inter-écosystèmes et inter-échelles en intégrant des nouvelles approches de télédétection.

Par ailleurs, les participants de l'atelier «la matière organique dans tous ses états» avaient déploré le cloisonnement des travaux portant sur les écosystèmes continentaux, le continuum Terre-Mer et les écosystèmes marins et côtiers. Il existe des projets portant sur

des écosystèmes très différents dans FairCarboN (par ex. zones humides côtières, mangroves, tourbières et continuum Terre-Mer, lacs, pergélisols, forêts et agrosystèmes). L'un des objectifs de ces regards croisés sur ces différents écosystèmes au sein d'un même programme est de permettre une approche décloisonnée et enrichie de notre compréhension générale du cycle du carbone dans les écosystèmes continentaux. L'atelier de 2017 a donc contribué à identifier des axes de recherche dont FairCarboN a pu se nourrir. Il a également permis de renforcer la structuration de la communauté, ce qui est un atout important pour répondre aux appels d'offres sur des temps souvent très courts.

“**Le programme PEPR FairCarboN (<https://www.pepr-faircarbon.fr>) repose sur 16 projets. Cinq «projets ciblés» viennent en soutien à des dynamiques collectives de production de données (notamment Infrastructures de Recherche) et de modélisation.”**

# Interface entre la basse atmosphère et les surfaces continentales

Plusieurs aspects prospectifs importants qui étaient mis en avant dans l'atelier Interface entre la basse atmosphère et les surfaces continentales semblent avoir beaucoup progressé. Il en est ainsi des thèmes scientifiques transverses aux questions i) Hydrologie et cycles biogéochimiques, ii) Émissions et dépôts et iii) Couplage des modèle.

**Les émissions de composés organiques biogéniques et des bioaérosols.** La combinaison d'outils de pointe de chimie analytique et de biologie moléculaire ont permis notamment d'identifier leurs sources principales et les espèces microbiennes dominantes dans les particules atmosphériques ainsi que les processus biologiques et chimiques sous-jacents. On comprend également mieux les processus d'émission et de toxicité de ces composés. La prise en compte de ces connaissances nouvelles dans la modélisation intégrée à grande échelle reste néanmoins encore trop peu avancée et devrait faire l'objet de travaux spécifiques dans le futur.

**Le rôle des bactéries sur les échanges d'azote avec l'atmosphère.** Les processus biogéochimiques dans le sol et les forçages environnementaux qui les pilotent sont mieux décrits et ont apporté une vision plus réaliste des flux de composés azotés vers l'atmosphère et leur impact sur la physico-chimie de l'atmosphère. L'impact des dépôts (notamment humides) sur les écosystèmes et les sols (notamment les bactéries dans le sol) reste une question moins avancée, mais qui fait l'objet d'études en cours (fusion mesures — modèles, qualification et quantification des communautés bactériennes dans les sols après traitement azoté, rétroactions vers l'atmosphère...). C'est non seulement, une question transverse à la prospective OA, notamment en zone tropicale (en lien avec le cycle du carbone), mais également pour la cryosphère. Ceci rejoint les études sur le continuum sol-eau-plante-atmosphère, et le contrôle des flux

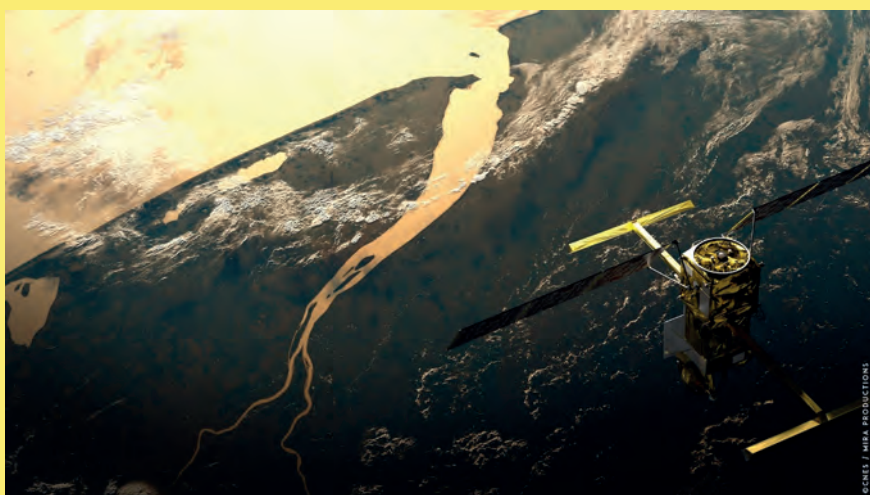


Le SNO Observil pour l'étude des socio-écosystèmes urbains.  
Crédit image: Observil.

## Le SNO Observil : un réseau d'observatoires des socio-écosystèmes urbains

Le Service National d'Observation Observil, labellisé en 2020, est un réseau de 11 observatoires de recherche axés sur l'étude des environnements urbains, soumis à une forte pression anthropique dans un contexte des changements globaux, en se concentrant sur leur fonctionnement physique, biologique et géochimique. Ce réseau se focalise sur les processus de la Zone Critique urbaine, marquée par une enveloppe construite qui influence son fonctionnement. Le réseau Observil a pour objectifs de (i) structurer de manière cohérente et reproductible les actions d'observation sur ces sites, (ii) mutualiser les compétences et protocoles de mesure, et (iii) centraliser les données issues des observations réalisées sur des sites présentant des morphologies urbaines et des contextes pédoclimatiques

contrastées, au sein d'une infrastructure de données ouverte et interopérable. Ce partage de données permet à la communauté scientifique de mieux comprendre le fonctionnement des socio-écosystèmes urbains grâce à une approche systémique, et de répondre à des questions scientifiques transversales, telles que la détermination des bilans d'eau, d'énergie et de matière dans des environnements en mutation. Porté par l'OSUNA, Observil s'inscrit dans le paysage national comme un élément structurant, en participant à l'Infrastructure de recherche OZCAR, au réseau des Zones Ateliers, et à travers l'association de 7 OSUs et de 6 Zones Ateliers, soutenant ainsi la démarche de structuration fédérative nationale. Plus d'information : <https://sno-observil.fr/>



Le satellite SWOT au-dessus de l'embouchure de la Gironde. Crédit image: CNES/Mira Productions.

## La mission SWOT : de nouvelles données pour une meilleure connaissance des eaux de surfaces à l'échelle globale

Le satellite SWOT (Surface Water and Ocean Topography), lancé en orbite le 16 décembre 2022, est une mission franco-américaine dédiée à l'hydrologie et à l'océanographie. L'originalité de cette mission réside dans son système de mesure altimétrique innovant, basé sur un radar interférométrique à large fauchée, qui permet de mesurer une bande de 120 km de large, alors que les altimètres classiques ne fournissent des mesures que sur une bande de quelques kilomètres à la verticale du satellite.

Grâce aux observations de SWOT, il est désormais possible d'accéder à un champ spatialisé des niveaux

d'eau et des pentes pour tous les fleuves de plus de 50 mètres de largeur, ainsi que pour les lacs et zones d'inondation dont la surface excède 250 mètres sur 250 mètres, avec une précision décimétrique. Pour l'hydrologie, cela représente des mesures régulières sur un grand nombre de cours d'eau, avec une fréquence de passage variant entre 2 et 7 fois tous les 21 jours. La mission ambitionne également de dépasser ces spécifications en fournissant des estimations du stock d'eau pour environ 30 millions de lacs à travers le monde, dont la superficie est supérieure à 1 hectare. Ces observations permettront

d'améliorer la connaissance globale des eaux de surface, en affinant les modèles hydrologiques et hydrodynamiques fluviaux, ce qui permettra des estimations plus précises des débits et un meilleur suivi des stocks d'eau des lacs et des retenues. Les applications découlant de ces données sont nombreuses, incluant la gestion des cours d'eau et des barrages, en particulier dans les bassins transfrontaliers, l'irrigation, la gestion des ressources en eau pour l'agriculture, l'estimation du transport solide, ainsi que la prévision des crues et la gestion des périodes de basses eaux.

échangés, mis en avant dans la précédente prospective. L'étude des **flux de matière et de contaminants entre les compartiments de la Zone Critique** a significativement avancé, notamment grâce aux développements analytiques qui ont permis des avancées notables, en particulier pour les polluants les plus volatils émis vers l'atmosphère lors de leur application (pesticides, fertilisants...) ou lors de ré-envols de poussières.

Par ailleurs, la caractérisation de **l'érosion éolienne des sols** en milieu aride ou semi-aride, en lien

avec des enjeux agronomiques via la fertilité des sols, a significativement progressé en particulier grâce à des campagnes expérimentales en zone subsaharienne et des approches de modélisation (financées par des programmes aux interfaces et par l'ANR).

La précédente prospective avait aussi souligné l'importance de l'étude d'interfaces spécifiques telles que le **milieu urbain, les milieux de montagne et la cryosphère**, au regard des enjeux sociétaux, environnementaux et climatiques associés. Ces milieux sont également étudiés par la communauté OA.

Pour le milieu urbain en particulier, la labellisation du SNO Observil (cf. encadré page précédente) constitue une avancée dans la structuration de l'observation sur le milieu urbain et péri-urbain et permettra de renforcer les liens avec OA via l'ajout d'observables. D'autre part, des avancées ont été réalisées sur la caractérisation et la modélisation des échanges d'eau et d'énergie au sein du continuum sol- plante-atmosphère, et sur la modélisation multi-échelles des interactions entre les surfaces urbaines et l'atmosphère. Plus généralement, l'une des avancées est la reconnaissance de la thématique

des environnements urbains *sensu lato* dans la prospective transverse de l'INSU.

Le point crucial qui semble avoir le moins avancé, est celui de la structuration des activités de recherche sur les milieux d'interfaces au sein de l'INSU et au-delà. Une proposition était de placer les interfaces dans un programme structuré, lisible, pluriannuel et avec un comité dédié. Les processus

inhérents aux interfaces rentrent difficilement dans les programmes classiques (LEFE ou EC2CO), et ont plus de mal à être financés. Un appel commun LEFE - EC2CO a été créé. On peut regretter que cet outil ait été peu sollicité. De même, l'étude des bioaérosols était ressortie comme une priorité scientifique pour des thèmes aussi divers que la santé environnementale, le fonctionnement des écosystèmes et

des communautés microbiennes, ou la physico-chimie de l'atmosphère. La proposition de GDR qui a fait suite à l'atelier « bioaérosols » du GT Atmosphère d'AllEnvi (2021), n'a malheureusement pas reçu l'appui des tutelles, alors même qu'elle visait à favoriser les échanges au sein d'une communauté scientifique multidisciplinaire.

## Le continuum homme-terre-mer

La conclusion des prospectives 2018 - 2022 concernant l'étude du continuum Homme-Terre-Mer (CHTM) mettait en avant la nécessité de le considérer non comme un simple lieu de transfert, mais comme un objet propre en tant que tel. Au cours des dernières années, la structuration des communautés autour des deux IR eLTER, sur les bassins versants, et ILICO, sur le littoral, a été en ce sens un élément déterminant en permettant une réelle appropriation des objets avec des projets fédérateurs emblématiques centrés sur ces objets. On peut juste regretter l'aspect encore trop ténu des relations et des projets entre les deux communautés.

Le rapprochement des deux IR OZCAR et RZA a permis d'accroître la nécessaire interdisciplinarité des approches pour aborder le CHTM même s'il manque encore des projets emblématiques. L'intégration des SHS sur le volet littoral est encore perfectible même si des projets emblématiques (e.g. Futurisk du PPR Océan & Climat) concrétisent cette approche interdisciplinaire. Un autre aspect mis en avant lors de la prospective était la nécessité de développer de nouveaux outils et méthodes de mesures dans ces zones d'interfaces souvent complexes où le besoin en nouvelles données avec un accroissement des emprises spatiales, des profondeurs temporelles, des résolutions spatiales et temporelles sont fondamentales afin d'aborder une modélisation 5D. Les projets Critex et TERRA FORMA, entre autres, permettent de combler ces lacunes avec des développements ou la généralisation de l'utilisation de capteurs biochimiques, de drones, de LIDAR bathymétriques, de gliders, à haute

fréquence ou haute résolution, etc. De plus, la montée en puissance de l'IR DataTerra *via* ses deux pôles Theia et Odatis a accompagné efficacement l'intégration d'un volume de plus en plus important de données. Le besoin d'accroissement des moyens humains avait été mis en avant. Malheureusement sur cet aspect, notamment sur les postes CNAP, la rareté des ouvertures de postes fragilise plusieurs SNO de la communauté SIC. Le lien avec les décideurs publics s'est également accru avec la généralisation de la participation des chercheurs aux différentes instances (e.g. Réseau national des observatoires du trait de côte (RNOTC)). Reste à évaluer l'impact réel de ce type de participations sur notre capacité à travailler avec les décideurs publics. Des questions davantage sociétales ont largement été abordées (e.g. contaminations, transferts et impacts des nanoparticules, des Terres Rares et des PFAS, etc.) suite à la prospective 2018-2022.

La communauté a largement progressé dans la compréhension des systèmes et des milieux dans toutes leurs dimensions et s'est engagée dans des projets visant à proposer des actions préventives (et pas uniquement curatives), notamment en s'appropriant des solutions basées sur la nature qui connaissent un fort essor. Certains environnements avaient été mis en avant comme prioritaires. Les projets autour des estuaires ont ainsi permis de fédérer la communauté et permis des approches inter-estuaires (Action spécifique EC2CO ; Projet RIOMAR du PPR Océan & Climat, cf. encadré ci-contre).



Panache du Rhône près de son embouchure en Méditerranée. Le NO Téthys II effectue des prélèvements près de la bouée instrumentée Mesurho. Crédit photo: RiOMar.

## Le projet RiOMar du PPR Océan : observer et anticiper l'évolution des zones côtières françaises sous influence des fleuves au XXI<sup>e</sup> siècle

Le projet RiOMar vise à anticiper les changements des écosystèmes côtiers dans les zones soumises aux apports des fleuves (RiOMar) au cours du XXI<sup>e</sup> siècle, avec pour objectif la préservation ou la remédiation des dommages potentiels causés par les forçages conjugués des activités humaines et du changement climatique. Les crises liées à l'eutrophisation, à la désoxygénation des zones côtières, à la contamination des eaux et des sédiments, ainsi qu'à l'acidification accrue du milieu marin en domaine côtier, pourraient être amplifiées par les effets du changement climatique. En effet, des phénomènes tels que la modification des circulations côtières, le renforcement de la stratification, et les événements extrêmes (tempêtes, crues des fleuves, vagues de chaleur) risquent d'accroître l'intensité de ces crises environnementales. Ces effets combinés n'ont jamais été

étudiés de manière globale, et le projet RiOMar cherche à y apporter des réponses en s'appuyant sur trois axes principaux : une observation renforcée du milieu côtier et de ses multiples gradients, à l'aide de moyens mobiles et d'outils d'observation intelligente ou à faible coût ; la modélisation à haute résolution des systèmes côtiers (physique, chimie, biologie) pour l'ensemble du XXI<sup>e</sup> siècle, afin de prévoir les impacts cumulés des activités humaines et du changement climatique ; et enfin, la coconstruction d'un lien avec les gestionnaires dès le début du projet, pour répondre de manière optimale aux attentes sociétales et aux besoins de gestion. L'effort de recherche initié dans le cadre du projet RiOMar résulte d'une construction issue de la communauté SIC, particulièrement au travers du projet transversal « Estuaires » (EC2CO), qui a favorisé la naissance des projets

DeltaRhône et RebelRed. Ces projets, ainsi que la communauté structurée autour du réseau ILICO, ont constitué la base du projet RiOMar, financé par le PPR-Océan.

Le projet RiOMar vise également à transformer nos pratiques d'observation des milieux d'interface Terre-Mer, en intégrant la spatialisation des observations à travers l'utilisation de moyens mobiles, de satellites ou de dispositifs dispersés à bas coût. De plus, il établit un lien étroit avec la modélisation dès la conception du projet. Cela représente une opportunité majeure pour l'évolution des pratiques de la communauté SIC dans les années à venir, en renforçant l'interaction entre observation et modélisation pour une meilleure compréhension et gestion des écosystèmes côtiers.

“  
**Un autre aspect mis en avant lors de la prospective était la nécessité de développer de nouveaux outils et méthodes de mesures [...] afin d'aborder une modélisation 5D.**”

# Événements extrêmes – aléas et risques

Depuis la dernière prospective SIC en 2017, les événements extrêmes et leurs impacts sur les territoires rythment l'actualité des pays du Nord comme celle des pays du Sud. Le GIEC dans son 6<sup>e</sup> rapport en 2021 dédie un chapitre spécifique « impact, adaptation et vulnérabilité » dans lequel sont pointés les inégales progressions en matière de réduction de gaz à effet de serre et de mesures d'adaptation ainsi que les écarts entre les actions engagées et ce qui est nécessaire pour faire face aux risques croissants. Dans ce chapitre, les événements extrêmes et les risques associés guident en grande partie la réflexion du GIEC en mettant en avant les avancées et les besoins de recherche inter et transdisciplinaires nécessaires pour accompagner la décision. De la même manière, l'IPBES, dans son dernier rapport en 2019, fait état d'une crise sans précédent, où l'altération directe de la biodiversité est due, dans l'ordre, i) au changement d'utilisation des sols et littoraux, ii) à la surexploitation directe des ressources, iii) aux changements climatiques, et notamment l'augmentation de l'intensité et de l'occurrence des événements extrêmes, iv) aux pollutions des milieux et v) aux espèces exotiques envahissantes.

Face à ce constat, en partie intégré dans les réflexions de 2017, l'exercice de prospective avait identifié le besoin de mettre en place « une approche interdisciplinaire associant des scientifiques des "biogéosciences", des historiens, des sociologues, des anthropologues, des psychologues et des géographes humains. » Par ailleurs, la communauté SIC recommandait le lancement d'un programme national sur les « Aléas et événements extrêmes ».

**Les lancements du Programme Prioritaire de Recherche (PPR) Océan & Climats et des PEPR en 2020** dans le cadre du plan de relance France 2030 a offert un cadre pour répondre en partie à ces deux enjeux. Grâce à la coordination rapprochée du CNRS et de l'INSU en particulier, les **PEPR Risques** et **PEPR TRACCS** ont vu le jour et ont été retenus respectivement, en 2022 et 2023.

Le **PEPR Risques (IRIMa)** vise « à formaliser une science des risques pour contribuer à l'élaboration d'une nouvelle stratégie nationale de gestion des risques et des catastrophes, à l'ère des changements globaux. » Il fédère des communautés de disciplines complémentaires (géosciences, ingénierie, sciences du numérique, sciences humaines et sociale)

et ambitionne la promotion de l'interdisciplinarité pour répondre aux différentes dimensions de l'analyse et de la gouvernance des risques (e.g. identification, surveillance, évaluation, gestion de crise, post-catastrophe, remédiation, prévention, etc.). Ce projet est un vrai succès au regard des besoins identifiés en 2017, et pour son ancrage multi-organismes contribuant ainsi à la structuration nationale autour de ce thème.

Le **PEPR TRACCS**, plus spécifiquement les **projets ciblés EXTENDING** et **DIALOG**, contribueront également aux besoins identifiés en 2017. Ancré sur les enjeux de la modélisation climatique, le **PEPR TRACCS** est motivé par la production de données utiles pour répondre directement aux questions sociétales. Étant donné l'impact des phénomènes extrêmes sur de nombreuses activités et écosystèmes, le projet ciblé **EXTENDING** a été construit pour fournir « des informations sur les phénomènes extrêmes attendus dans le futur, d'aider ainsi à planifier l'adaptation et de faciliter des débats éclairés sur l'atténuation. » Les interactions avec les parties prenantes seront menées dans le cadre du projet ciblé **DIALOG** qui vise à promouvoir l'inter et la transdisciplinarité pour

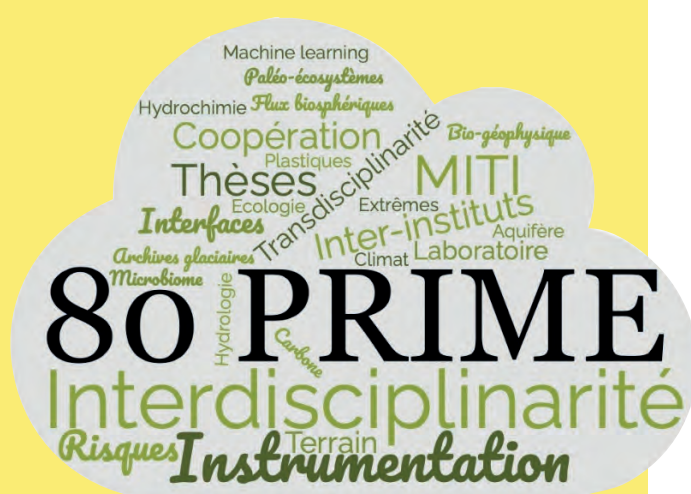
accompagner la coconstruction de services climatiques utiles, durables et transformants.

Il est indéniable que la construction de ces **PEPR** et les financements acquis sont de très belles réussites à mettre au crédit des communautés scientifiques concernées mais également de la direction de l'INSU très présente dans la phase de construction. Il n'en demeure pas moins que quelques préoccupations apparaissent. La première concerne le fonctionnement actuellement en « silo » des **PEPR**. Autour du thème des extrêmes et des enjeux d'adaptation, il serait nécessaire d'engager plus clairement des liens dès lors que ces deux **PEPR** peuvent être amenés à travailler sur les mêmes territoires engageant les mêmes acteurs, et, actuellement, de façon non concertée. La deuxième concerne l'articulation entre les programmes nationaux et les **PEPR**, tout ne sera pas traité dans les **PEPR**, il est donc nécessaire que les programmes nationaux restent ouverts à ces thématiques pour défendre le besoin d'une répartition équitable des moyens. Enfin, la gestion des appels à projets par l'ANR interroge également entre une éventuelle déconnexion entre les objectifs du **PEPR** et les critères « d'excellence » de l'ANR, qui sont parfois difficiles à conjuguer avec

## Les thèses 80 PRIME : une opportunité pour l'interdisciplinarité dans les recherches en SIC

Dans le but de faire émerger de nouvelles questions scientifiques et méthodologiques sur des sujets transversaux aux instituts du CNRS, la Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires (MITI) du CNRS a lancé en 2021 l'appel d'offres 80 PRIME (<https://miti.cnrs.fr>). Ce programme, reconduit chaque année depuis 2021, finance une centaine de projets soumis par les instituts (dont 8 pour l'INSU), selon une répartition définie par le DGDS. Ces projets, portés par au moins deux instituts, financent une bourse de thèse et offrent un accompagnement pour la recherche, avec un financement maximal de 30 k€/an pendant deux ans. Comme les projets

sont rédigés par les chercheurs sur sollicitation des instituts (top-down), le taux d'échec auprès de la MITI est très faible. En 2024, l'INSU a choisi de modifier sa procédure en sollicitant des propositions via la plateforme Dialog. Au sein de la communauté SIC, les collaborations se concentrent principalement avec les instituts CNRS Écologie & Environnement, CNRS Physique, CNRS Chimie et CNRS Ingénierie, autour de projets liés aux développements instrumentaux (sondes hydrologiques haute résolution, systèmes microfluidiques, etc.), aux outils numériques, en particulier dans le domaine de *machine learning*, ainsi qu'aux



Thèses 80 PRIME et nuage de mots des projets sélectionnés dans le domaine SIC. Crédit image: Marc Jolivet.

travaux intégratifs de terrain et de laboratoire (géochimie de l'environnement, gestion des déchets plastiques, écotoxicologie microbienne, etc.). Les liens entre la communauté SIC et la MITI se manifestent également à travers d'autres actions de cette dernière, telles que les Défis Sociétaux, les appels à projets régulièrement renouvelés, et le financement de mobilités interdisciplinaires.

“  
Le PEPR Risques (IRIMa) vise « à formaliser une science des risques pour contribuer à l'élaboration d'une nouvelle stratégie nationale de gestion des risques et des catastrophes, à l'ère des changements globaux. »

des projets transdisciplinaires, engageant pleinement les parties prenantes non académiques. L'émergence des PEPR, fondamentalement ancrés dans une démarche scientifique interdisciplinaire « radicale », c'est-à-dire à l'interface des géosciences et des sciences humaines et sociales, invite à renforcer cette expertise, notamment via la « *promotion de 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* ». Cette recommandation issue des prospectives SIC de 2017 a été inégalement « suivie ». Les organismes nationaux (e.g. CNRS, IRD) s'attachent à maintenir des commissions interdisciplinaires, la CID52 Environnement & Société pour le CoNRS, l'inter-CSS Sciences de la Durabilité pour l'IRD, qui permettent le recrutement au niveau CRCN et DR2 mais ne sont pas mandatées dans la promotion des chercheurs titulaires (CRCN-

>CRHC ; DR2->DR1), cette dernière étant assurée par les sections / CSS « disciplinaires ». Les recrutements interdisciplinaires au niveau des universités restent beaucoup plus ténus, hormis quelques CPJ, notamment dans la mesure où il n'existe pas de section « interdisciplinaire » au CNU. Notons également qu'il reste difficile, voire impossible dans certaines universités, de faire reconnaître des recherches doctorales interdisciplinaires « radicales » dans deux ou plusieurs écoles doctorales différentes ou des programmes de Master interdisciplinaires dans des composantes différentes de la même université. Globalement le recrutement et l'expertise interdisciplinaire restent en recul au regard d'autres pays européens (e.g. Suède) alors que la programmation scientifique invite à renforcer ces démarches. La formation par la recherche (e.g. doctorat) est difficile à faire reconnaître alors que les jeunes chercheurs sont souvent très motivés par ce type d'approche holistique.

# Coconstruction des recherches SIC avec les SHS

Lors du dernier exercice de prospective 2018-2022, les besoins d'interactions entre la communauté SIC et d'autres communautés issues des SHS avaient été indiqués comme souhaitables dans la plupart des ateliers. Ceci visait notamment à mieux contraindre les impacts anthropiques passés sur les socio-écosystèmes ou bien à inscrire les résultats des recherches en SIC dans les réponses aux questions d'adaptation et d'acceptabilité sociétale. Force est de constater que la création récente des PEPR, ancrés dans une démarche scientifique inter- et transdisciplinaire incite la communauté SIC à renforcer ces interactions. Pour rendre compte des progrès réalisés dans ces interactions ou bien des freins qui perdurent depuis la dernière prospective, une enquête a été réalisée à l'automne 2024 auprès de l'ensemble de la communauté sur l'état des lieux de la coconstruction des recherches SIC avec les communautés SHS. Ce sondage reposait sur 3 questions ouvertes :

- Quelles collaborations avec les SHS avez-vous réalisées ou tenté de réaliser ces 5 dernières années ? Expliciter les disciplines, contacts (instituts/laboratoires), thèmes, méthodes, base de données, etc.
- Quelles sont les synergies et les difficultés rencontrées ?
- Quels seraient les besoins et quelles pourraient être les pistes d'amélioration ou de renforcement des interactions avec ces communautés SHS dans le futur pour les recherches SIC ?

Cette enquête a récolté un total de **45 réponses** provenant de nombreuses unités. Au travers de ce questionnaire, 12 disciplines propres au SHS ont été recensées comme ayant fait l'objet d'une tentative d'interactions ou bien d'une interaction effective, les plus souvent mentionnées étant la Géographie (20), la Sociologie (9) et l'Anthropologie (9). Les thématiques présentant un intérêt pour interagir avec les communautés SHS se regroupent selon deux axes forts, i) **mieux connaître les forçages anthropiques présents et passés** (contraindre les analyses, comprendre les évolutions de l'environnement, caractériser l'impact anthropique passé sur les écosystèmes, utiliser une zone spécifique d'occupation des sols comme input de modèle), et ii) **améliorer le retour des recherches**

**vers la société** (perception de la pollution environnementale, du risque et identification des leviers d'adaptation, comprendre les pratiques, acceptabilité sociétale et recommandations associées). L'enquête a permis de mettre en lumière plusieurs expériences réussies conduisant à une synergie entre disciplines. Ces réussites ont mis en évidence plusieurs points facilitant la conduite de projets SIC-SHS tels que i) **se côtoyer** (e.g. présence de chercheurs SHS dans les UMR INSU/CNRS Écologie & Environnement ou dans les OSU, projets communs, structures collaboratives de recherche favorisant l'interdisciplinarité, etc.), ii) **se former mutuellement** (e.g. écriture de projet, étude de terrain, enquêtes coconstruites, etc.) et iii) **s'appuyer sur des outils communs SIC/SHS** (e.g. thèses miroirs, écoles d'été, etc.) et enfin iv) **une réflexion méthodologique et de conduites de projets** (vocabulaire, coconstruction autour de questions scientifiques communes et d'un projet réellement commun, cocoordination, comité de pilotage interdisciplinaire, etc.). Si l'enquête a mis en évidence de réels progrès depuis la dernière prospective SIC, elle a également révélé la persistance de difficultés, principalement autour du **vocabulaire** (17) ou bien autour de l'identification des collègues SHS (7)

et enfin la **temporalité des projets**, jugée le plus souvent trop courte (6). Enfin, à la question concernant les besoins et les pistes d'amélioration qui pourraient permettre de favoriser les interactions avec les communautés SIC, l'enquête a révélé une grande convergence des réponses, notamment autour d'un souhait de **financements dédiés plus ouverts** (15) et d'une **réflexion autour de l'animation scientifique** pouvant favoriser les rencontres (14 ; conférences, séminaires, journées scientifiques...). Une partie de cet état des lieux et des pistes de réflexions sont développées plus en profondeur ci-dessous dans le chapitre « Continuum Sciences-Société et Transdisciplinarité ».

# 02 | Défis thématiques

INTERFACES ET CONTINUUMS DANS LES SIC	36
INTÉGRATION DES DIFFÉRENTES ÉCHELLES D'ESPACE ET DE TEMPS DANS L'ÉTUDE DES SIC	50
STOCKS & RESSOURCES NATURELLES (EAU, CARBONE ET MÉTAUX CRITIQUES): DURABILITÉ DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT GLOBAL ET DE LIMITES PLANÉTAIRES	60
CONTAMINANTS & POLLUTIONS: DEVENIR, IMPACTS ET SOLUTIONS	72
ZONE CRITIQUE URBAINE ET PÉRI-URBAINE	88

# Interfaces et continuums dans les SIC



# Les enjeux

Les interfaces dans les SIC, définies comme des surfaces d'échanges d'eau, de matière et d'énergie entre des compartiments abiotiques (solide-liquide-gazeux) et/ou biotiques à différentes échelles spatiales (de la molécule au continent) et temporelles, constituent le cœur du fonctionnement des systèmes continentaux. Par nature, elles sont sensibles aux forçages climatiques et anthropiques. L'étude des interfaces devrait impliquer de larges communautés pluridisciplinaires. Cependant, l'interface est généralement étudiée sous un angle de vue principal sans toujours s'entourer de l'ensemble des domaines nécessaires à une vision plus holistique de l'objet. Le besoin d'intégrer un grand nombre de disciplines pour caractériser et comprendre la dynamique des interfaces demeure un verrou majeur.

À l'exception du Continuum Terre-Mer (CTM) où les gradients mécaniques, chimiques et biologiques sont nombreux parmi les contributions aux présentes prospectives, les notions de « continuum » ou de gradients sont presque absentes. L'une des raisons est sans doute la difficulté qu'éprouve la communauté scientifique à envisager les interfaces et les continuums comme des objets à part entière. En effet, la détection de gradients dans la Zone Critique constitue un défi et il est presque impossible de définir les limites spatiales et temporelles- d'un continuum. Un continuum peut également être perçu comme une échelle d'intégration, permettant d'appréhender un milieu complexe, composé, à l'échelle fine, de nombreuses interfaces. En définitive, la Zone Critique aborde peu cette question, car elle se concentre essentiellement sur les échelles fines, et la capacité limitée à remonter les échelles entrave l'approche continuum.

Cette thématique, relativement vaste, recoupe ou intègre plusieurs ateliers de la précédente prospective : cycles, liens entre processus biotiques et abiotiques, interface atmosphère/surface, CTM. Pour cette nouvelle prospective, nous distinguons quatre grands thèmes : les hétérogénéités des interfaces, les interfaces de l'océan, de l'atmosphère et du sous-sol avec les SIC, le CTM et l'interface biotique/abiotique. Nous avons choisi de supprimer la notion d'Homme dans le CTM car ce dernier ne correspond pas ici à un objet d'étude en soi et sera plutôt considéré comme un forçage majeur, au même titre que le climat et la géologie.

Ces grands domaines scientifiques, qui constituent l'ossature de cet atelier, reposent fondamentalement sur des observatoires (SNO et ZA). Ces observatoires devront nécessairement être complétés par de nouveaux observatoires à mettre en place dans des lieux qualifiés de critiques, comme les mangroves, lagunes, herbiers, système agricole, micro-forêts (cf. chapitre « Observons les observatoires » p. 96), en raison de leur extrême sensibilité et vulnérabilité face aux changements globaux. Ainsi, afin de comprendre le fonctionnement au sens large de nos systèmes naturels ou anthropisés, ainsi

que leur vulnérabilité et leur résilience, la communauté a mis en avant des stratégies communes fortement affectées par les impacts et la contribution des forçages haute fréquence d'ordre météorologique et anthropique, modulés par ceux d'ordre climatique et géologique.

La communauté des SIC montre de nombreuses connexions avec les domaines OA et TS de l'INSU. Cette porosité s'exprime naturellement à travers les échanges de matière et d'énergie, qui ne connaissent pas de frontières. Cependant, les modèles actuels proposés sont souvent mono-thématique sans réelle intégration des processus. Par exemple, le sol, en tant que compartiment frontière où l'Homme exerce une action directe sur le stockage du carbone, est le siège de nombreux processus biogéochimiques, de temporalité variable (couplage temps court/temps long), qui sont mal intégrés dans les modèles climatiques et dans la compréhension des cycles biogéochimiques à grande échelle. Une autre insuffisance se manifeste à l'interface des domaines SIC/OA, où les dépôts atmosphériques, incluant les nutriments, le carbone organique, les microorganismes, voire les toxines, devront être mieux contraints, car ils participent activement à la variabilité des activités biologiques ainsi qu'aux cycles biogéochimiques des éléments, et plus généralement aux transferts d'énergie et de matière.

En ce qui concerne la biodiversité, il sera nécessaire de prioriser la détection et la compréhension de sa dynamique, par exemple le long de gradients latitudinaux et altitudinaux, au sein des observatoires et des lieux critiques, tels que l'interface Terre-Mer, en particulier les sites dépendant fortement des paramètres climatiques (températures, précipitations) et des usages des sols. À plus petite échelle (e.g. biofilms), des efforts devront être menés pour comprendre les interactions au sein des populations de microorganismes, ainsi qu'entre les microorganismes et l'environnement, leur coalescence, et les impacts qui en résultent sur les cycles biogéochimiques, notamment ceux des nutriments.

Des surfaces continentales aux interfaces Terre-Mer, la compréhension et la modélisation de la variabilité et de l'hétérogénéité des transferts d'énergie et de matière, qu'ils soient particuliers, dissous ou biologiques, incluant les contaminants, doivent reposer sur une intégration, tant spatiale que temporelle (emboîtement d'échelle, descente d'échelle). Il s'agira notamment de rechercher les « hotspots » et « hot moments » et d'intégrer les changements d'échelle temporelle (lien temps courts/temps longs). De manière générale, la notion de trajectoire des objets étudiés par les SIC se nourrit de l'analyse de chroniques temporelles récentes et passées (notion de rétro-observatoire), dont l'étude conjointe permettra d'apprécier les liens entre flux de matière, leur dépôt et leur préservation. Ces trajectoires, régulées par divers processus bio-géo-physiques souvent non linéaires, parfois discontinus dans le temps, nécessitent

une approche visant à comprendre leur dynamique, leur contribution aux flux de matière, et *in fine*, leur impact sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes. Notre communauté doit en particulier concentrer ses efforts sur l'identification des effets de seuils, des points de bascule et des rétroactions dans les écosystèmes, les cycles biogéochimiques, et examiner leurs liens avec les événements climatiques extrêmes, détectables dans les archives récentes. En effet, ces événements occupent une place croissante au sein des SIC, et ce, quels que soient les scénarios d'évolution climatique, leur occurrence et intensité (e.g. sécheresse, crues, inondations, tempêtes, etc.) augmenteront au cours de ce siècle. La communauté SIC doit donc poursuivre et intensifier ses efforts pour comprendre le rôle que ces événements peuvent jouer sur les transferts de matière et d'énergie, tant qualitatifs que quantitatifs, ainsi que sur les échanges biotiques et abiotiques et sur les cycles biogéochimiques.

Des enjeux plus transversaux, notamment pour le cycle de l'eau et du carbone, demeurent cruciaux pour la communauté SIC. La mise en place récente de programmes ambitieux tels que les PEPR et PPR (domaine OA) FairCarboN et OneWater couvrent ces deux grands cycles mais doivent cependant être mieux intégrés en dépassant également les frontières des SIC. Pour les interfaces et les continous, l'eau reste une interface majeure dans les SIC, considérée à la fois comme

vecteur, réacteur, ressource et habitat (Figure 1). Son cycle, extrêmement sensible aux changements globaux, nécessite de poursuivre nos investigations, en particulier pour caractériser et modéliser: i) l'hétérogénéité de ses chemins et temps de résidence dans la Zone Critique (e.g. dans la zone vadose), notamment à l'aide d'outils géophysiques, ii) l'hétérogénéité spatiale et temporelle des échanges nappe-rivière, incluant ripisylves et zones hyporhéiques, iii) la réponse de la végétation aux stress hydriques, notamment l'impact sur la variabilité de la disponibilité en nutriments, et iv) l'hétérogénéité des échanges aux interfaces biotiques/abiotiques. Aux interfaces Terre-Mer, compte tenu des enjeux à venir telles que la hausse du niveau moyen des océans, notre communauté est attendue pour comprendre comment les masses d'eau (douce, saumâtre, salée) interagissent, en tenant compte de l'origine de ces masses (e.g. nature du substratum). Plus particulièrement, au sein du CTM, et au-delà des communautés propres à l'INSU et à CNRS Écologie & Environnement, l'une des priorités est d'amplifier nos collaborations avec les SHS, notamment avec les sciences économiques, politiques, sociales et en géographie, autour des questions d'usages de l'eau et des sols par les sociétés humaines. En effet, ces usages, directement impactés par les changements globaux, sont actuellement peu ou mal intégrés dans notre compréhension du cycle de l'eau.

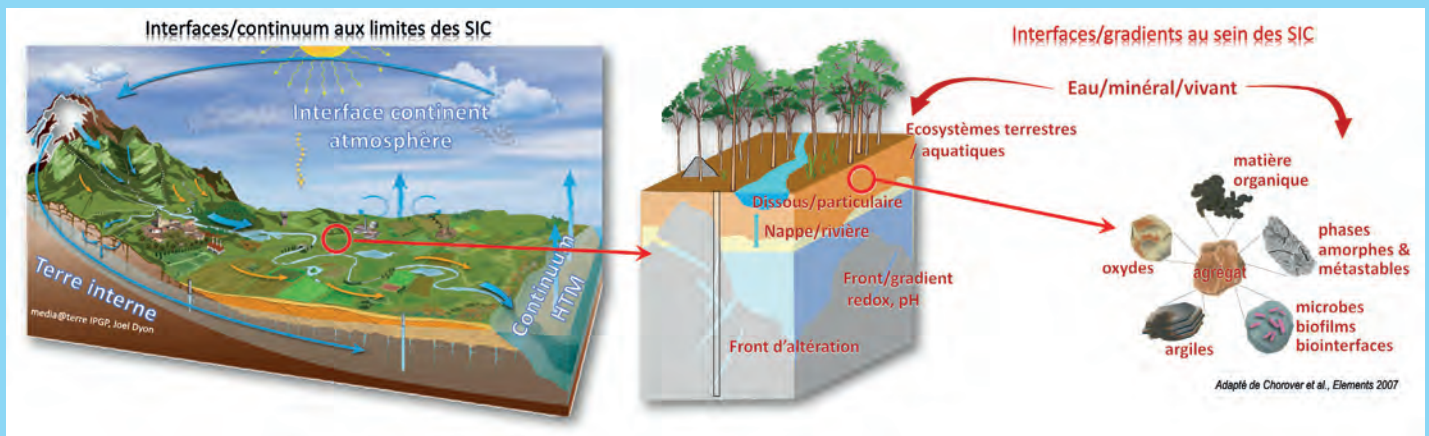


Figure 1. Interfaces et continuum aux frontières et dans les surfaces continentales. (Crédit: J. Riotte).

# Les quatre grands thèmes identifiés et leurs questionnements

## Rôle des hétérogénéités spatio-temporelles des interfaces dans le fonctionnement des SIC

Cette sous-thématique, transversale aux trois autres axes de cet atelier, interroge plus particulièrement le rôle de l'hétérogénéité des interfaces à l'échelle du territoire en termes de structure, composition, et évolution, ainsi que des échanges d'énergie, d'eau et de matière entre interfaces dans la dynamique des surfaces continentales et leurs réponses aux changements globaux. Il s'agit de se poser les questions suivantes : i) quel type d'hétérogénéité convient-il de caractériser ? ii) comment optimiser ou coupler les outils ou approches interdisciplinaires pour caractériser l'hétérogénéité ? iii) comment identifier la nature des mécanismes ou des propriétés du milieu susceptibles de générer l'hétérogénéité afin de pouvoir spatialiser et modéliser ce type d'information ?

### Quelles hétérogénéités ?

Les SIC, et donc les interfaces qui les composent, sont par nature hétérogènes. À l'échelle régionale, la structure et la géométrie du substratum, c'est-à-dire la lithologie et ses propriétés structurales contrôlent les zones préférentielles d'écoulement, leur dynamique ainsi que les interactions entre la Zone Critique profonde et la surface, en particulier dans les zones de relief. L'hétérogénéité latérale et verticale de la couverture d'altération, incluant le sol de surface et le saprolite, en termes d'épaisseur, de porosité, de perméabilité, de composition minéralogique et géochimique, constitue une interface particulièrement complexe avec l'eau et les organismes vivants. Cette interface est encore trop peu explorée malgré son rôle crucial pour le fonctionnement des écosystèmes. La diversité des chemins de l'eau en est une illustration : ces chemins se répartissent de manière souvent inconnue entre la microporosité et la macroporosité. Au sein de la **microporosité**, les forces capillaires favorisent la diffusion et les interactions avec les minéraux, les racines et les microorganismes, régulant l'extraction de nutriments et la formation de minéraux secondaires. En revanche, la **macroporosité**, dans des zones souvent plus discrètes comme les fissures et les failles, favorise la circulation et contribue aux transferts à l'échelle du système. Il est d'autant plus important de caractériser ces interfaces que leur hétérogénéité contrôle la dynamique de la Zone Critique à court terme, c'est-à-dire la disponibilité et les stocks d'eau et de nutriments pour les organismes vivants. Elle contrôle les propriétés du milieu en termes d'infiltration, de dynamique (stockage/flux) du carbone, d'altération chimique, et de diversité microbienne et de ses fonctions. La rhizosphère où la diversité microbienne est particulièrement riche, où les gradients chimiques (pH, redox, CEC) sont nombreux et où la pédogenèse est

intense, est une zone dont la dynamique en profondeur reste à explorer. De même, dans le contexte des changements globaux et de pression sans précédent sur les sols, la dynamique des éléments chimiques et des molécules (nutriments et polluants) dans la végétation pérenne et leur allocation dans les différents compartiments deviennent des enjeux essentiels pour comprendre, d'un point de vue quantitatif et mécaniste, comment la végétation résiste aux stressés ou redistribue des nutriments dans l'écosystème.

À grande échelle, deux grands types d'hétérogénéités à la surface et à la marge des continents semblent encore sous-explorés par la communauté SIC : i) les implantations humaines, qui créent aussi des interfaces et modifient fortement les échanges aux interfaces tout en constituant des zones de flux de matière convergents et des hotspots d'émissions, et ii) le CTM, où la quantification des échanges aux interfaces et de leur lien avec le vivant reste un défi.

### Relier les besoins et les outils

De manière générale, la caractérisation de l'hétérogénéité reste encore peu maîtrisée et monodisciplinaire. L'interdisciplinarité est nécessaire et devrait inclure l'acquisition d'informations discrétisées et suivies dans le temps (e.g. images, variables physico-chimiques, etc.), ainsi que des moyens de traitement et de stockage adaptés. De plus, il est crucial de développer des modèles capables d'intégrer une information discrétisée (e.g. modèles capables gérer des données sous forme de catégories ou de valeurs discrètes, non continues, et d'en tester les effets sur les sites les mieux caractérisés).

Notre capacité à caractériser l'hétérogénéité des interfaces ou des flux aux interfaces progresse grâce à l'évolution de technologies telles que la télédétection ou, plus généralement, les techniques d'imagerie (géo)physique, de tomographie à des résolutions et sensibilités fines, ainsi que le déploiement de capteurs innovants, sobres ou à faible coût. La capacité à traiter l'information progresse encore plus rapidement grâce à l'intelligence artificielle et au potentiel d'apprentissage de réseaux de neurones. Cependant, l'appropriation de ces techniques par la communauté mérite d'être encouragée et démocratisée, si nécessaire par le développement d'interfaces ou d'outils ergonomiques et généralistes (GT Formation). Cela impliquerait d'accroître les interactions et de rapprocher les communautés pluridisciplinaires proches du terrain avec les équipes et services disposant de moyens de caractérisation, ou en développement (e.g. TERRA FORMA). Il serait également pertinent de développer les outils de l'intelligence artificielle (IA) et de former les communautés SIC à leur utilisation. Dans cette perspective, l'archivage de l'information spatialisée, brute et/ou traitée, et son accessibilité constituent un

enjeu majeur. Il serait utile d'anticiper la possibilité de retravailler l'information pour l'affiner ou la diversifier (une image peut en contenir de nombreux types) au fur et à mesure des avancées technologiques. En ce qui concerne les interactions du vivant avec la Zone Critique, des collaborations plus étroites entre biologie/écologie et sciences physiques et chimiques de la Zone Critique seront déterminantes pour comprendre comment les besoins des organismes vivants contrôlent la dynamique des échanges dans le sol rhizosphérique, y compris dans sa partie profonde. Ces collaborations pourront être mises en œuvre en associant, *in situ* ou en mésocosme, des techniques d'analyses issues de la biologie au sens large (e.g. physiologie, microbiologie, écologie, génomique), des sciences du sol (e.g. structure du milieu, minéralogie) et de la géochimie (e.g. spéciation, fractionnements isotopiques, transformation de la matière organique), tout en intégrant des séries temporelles. Un effort particulier devra être fourni pour renforcer les approches -omiques (génomique, protéomique, métabolomique) des microorganismes du sol, car une majorité d'espèces microbiennes reste inconnue ainsi que leur rôle dans le fonctionnement des écosystèmes, notamment en ce qui concerne le cycle des nutriments.

### Identifier les contrôles de l'hétérogénéité

L'effort de caractérisation de l'hétérogénéité dans les interfaces et continuums doit permettre de comprendre son rôle dans le fonctionnement des écosystèmes, puis d'identifier les propriétés du milieu et/ou les processus à l'origine des hétérogénéités. Cette étape est nécessaire pour **déterminer les échelles d'analyse et d'observation pertinentes afin d'intégrer l'anisotropie** dans le fonctionnement des écosystèmes continentaux puis, d'adapter la granularité des propriétés des interfaces ou des flux à une échelle plus large. Cette transposition, qui reste un verrou à lever, devrait conserver la sensibilité nécessaire pour détecter les effets des changements globaux. L'objectif est d'aboutir à une vision intégrée qui prenne en compte la cascade de contrôles des interfaces physiques (structure granularité du milieu, connectivité, nature de la porosité, stocks, ressource en eau), jusqu'aux interfaces chimiques (réactivité, disponibilité des nutriments, échanges, mobilité des contaminants, etc.), et biologiques avec des rétroactions possibles sur la physique et la chimie du milieu (bioturbation, cycles biogéochimiques, évolution de la matière organique et plus généralement dynamique du carbone, accélération des cinétiques d'échanges). Cette approche permettra une modélisation plus complète des surfaces continentales (cf. chapitre « Intégration des différentes échelles d'espace et de temps dans l'étude des SIC » p. 50).

## Interfaces avec les domaines Océan-Atmosphère (OA) et Terre Solide (TS) de l'INSU

La récente prospective Océan-Atmosphère a permis de faire émerger des thématiques communes avec celles mises en avant par la communauté SIC, une démarche indispensable pour renforcer l'interdisciplinarité. Ainsi, le rapprochement SIC et OA vise à approfondir les approches biologiques, physiques et chimiques des processus en jeu dans cette interface et à représenter leurs interactions et les transferts associés. Ce rapprochement est particulièrement critique dans certains environnements clés, tels que les milieux urbains, les mangroves, les zones côtières et les zones polaires. Parmi les futurs travaux, certains devraient porter sur les sources, les stocks et le devenir du carbone et des éléments associés (nutriments, métaux et contaminants), notamment dans les **mangroves**. Cela est également valable pour tous les biogéosystèmes situés aux interfaces Terre-Mer, soumis à l'intensification des événements climatiques extrêmes et reculant sous l'effet des pressions anthropiques directes (urbanisation, aquaculture, agriculture). Les voies de collaborations SIC-OA concernent particulièrement l'interface sol-atmosphère, les processus en jeu dans la Zone Critique, ainsi que la modélisation. Celles relatives à SIC-TS concernent plus particulièrement le devenir des flux à long terme, les flux verticaux de matière et la gestion de ressources.

L'interface sol-plante-atmosphère, vue sous l'angle des processus de surface, incluant la phyllosphère, soulève la question de la mesure et modélisation des émissions et dépôts de composés gazeux et particulaires, tributaires des communautés microbiennes régissant les processus pédologiques liés aux dynamiques de la **végétation, des nutriments et du cycle hydrologique**. Les particules d'origine biologique en suspension dans l'air ou dans l'eau atmosphérique (bioaérosols) suscitent un intérêt croissant, car elles participent aux phénomènes de nucléation, tels que la formation de gouttelettes de nuage et de cristaux de glace, et induisent les précipitations. Les phénomènes de rétroactions (« bioprécipitations ») couplant végétation, précipitations et bioaérosols démontrent leur rôle crucial dans la **connectivité entre surfaces continentales, climat et cycle hydrologique**. Les aérosols terrigènes, quant à eux, jouent un rôle important dans le **transport d'éléments nutritifs**, en particulier vers l'océan. En ce qui concerne l'interface entre le milieu urbain et l'atmosphère, il devient primordial de mieux représenter les émissions de composés chimiques qui impactent l'habitabilité des villes et le climat.

La dynamique biogéochimique des **flux de nutriments et de contaminants** dans les bassins versants au sein de la Zone Critique, en intégrant les zones de régulation comme les **zones humides**, demeure un enjeu à toutes les échelles spatiales et temporelles, notamment pour le stockage et le recyclage de carbone et de nutriments. Les flux de nutriments sont, de fait, très fortement liés aux transferts d'eau dans les sols et entre les sols et



Exemple d'interface surface continentale-Terre solide. Profil de sol avec saprolite et racines de ficus (Banian trees, Inde, Bassin versant expérimental de Berambadi, SNO M-TROPICS).  
© Jean RIOTTE / GET

l'atmosphère, notamment en **milieux forestier et agricole**. Les cycles biogéochimiques du carbone et des nutriments (N, P) doivent donc être étudiés en lien avec l'eau et la végétation, par exemple, dans les bassins versants, les milieux forestiers, les zones tropicales, les zones humides, pour représenter les échanges de matière et d'énergie entre surfaces (sols et plantes) et atmosphère. Cela concerne notamment les émissions et dépôts d'éléments nutritifs, de contaminants et de métaux (aérosols terrigènes) ainsi que les bioaérosols. De même, l'altération des milieux profonds modifie le cycle de formation, le fractionnement et la minéralisation des éléments métalliques et les échanges avec l'atmosphère. Enfin, dans les environnements réducteurs, l'étude du cycle biogéochimique du soufre et des éléments chalcophiles est nécessaire pour comprendre les conditions d'eutrophisation dans les archives sédimentaires.

Les altérations environnementales observées aujourd'hui dans les **régions polaires** (échanges de masse et d'énergie entre atmosphère, océan, surfaces enneigées et englacées) sont les prémices de potentiels **bouleversements climatiques majeurs** aux conséquences globales. Comprendre et prévoir la variabilité du climat et de ses différentes composantes (atmosphère, cryosphère, surfaces continentales et océan) dépend

notamment de l'amélioration du contenu physique des modèles atmosphériques et de leur **couplage avec les surfaces**, par exemple par le biais de la convection atmosphérique pour le transport de polluants et des masses d'eau. Les réponses des écosystèmes de hautes latitudes au réchauffement climatique et à la **dégradation du pergélisol** sont liées à la diversité des écosystèmes, aux conditions pédologiques, à la nature du pergélisol et aux évolutions des conditions hydriques des sols. Le **couplage entre cycles de l'eau, du carbone et des nutriments, avec la dynamique de la végétation et des communautés microbiennes**, est essentiel pour une bonne représentation de ces interactions. En effet, les évolutions des stocks de carbone des écosystèmes continentaux ont et auront des conséquences majeures sur la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique et donc sur le climat.

Concernant la modélisation, il est indispensable de développer le **couplage des modèles** de surfaces avec la modélisation physico-chimique du transport atmosphérique, afin de transformer les variations de flux simulés en concentration atmosphérique. Cela nécessite : i) une description plus fine des **processus physiques et biogéochimiques** aux différentes échelles spatiales et temporelles, ii) une meilleure représentation de l'hétérogénéité spatiale et temporelle des échanges

et du couplage végétation, eau, carbone, éléments, et iii) une évaluation des **impacts des processus de fine échelle sur les cycles biogéochimiques**. Un enjeu pour les prochaines années concerne l'amélioration du réalisme de la représentation des surfaces continentales et de leurs hétérogénéités, y compris urbaines, dans les outils de modélisation, pour affiner les **bilans énergétiques, d'eau, de carbone, notamment** dans les modèles de surface/atmosphère. Au niveau des sols, le développement de modèles pour intégrer et coupler les processus de drainage, d'écoulement et de rétention est plus que jamais nécessaire, afin d'évaluer par exemple les ressources en eau et l'impact sur les cultures (irrigation, pluie).

À l'interface entre sédiments, eau, air (liens SIC/OA), l'interdisciplinarité reste à renforcer pour relier la biologie à la chimie et à la physique pour étudier les processus dans le système Terre. Quantifier les sources d'éléments majeurs (C, N, P, Si) et mineurs (métaux traces, métaux lourds) au sein des réseaux trophiques, et les **sources et le devenir du carbone organique** aux différentes interfaces sédiment/eau/air, nécessite une approche plus développée vers l'atmosphère, comme interface clé pour les cycles biogéochimiques des métaux dans l'océan. L'activité volcanique et ses impacts représente également un sujet qui recouvre les domaines TS/SIC/OA. Les collaborations avec le domaine Terre Solide doivent être également renforcées pour examiner la gestion des ressources dans le contexte de la transition énergétique, qui demandera des matières premières telles que les métaux, mais aussi l'eau, des énergies non carbonées (géothermie, hydrogène, etc.), ainsi que la maîtrise des techniques de stockage durable du CO<sub>2</sub> et de l'hydrogène (cf. chapitre « Stocks & Ressources naturelles » p. 60).

## Continuum Terre – Mer (CTM)

Correspondant à un atelier dans la prospective précédente, le CTM recouvre naturellement une large gamme d'échelles spatiales et temporelles. Il inclut donc les autres sous-thèmes de ce chapitre et a partiellement fait l'objet de la dernière prospective INSU-OA. Pour les SIC, observer, comprendre et modéliser le fonctionnement de ce continuum demeure un défi prioritaire, car il est le siège des échanges de matières et d'énergie entre les surfaces continentales et les domaines océaniques. Il est soumis aux changements globaux, mais aussi au forçage géologique, supposé constant, à l'exception des événements géologiques extrêmes comme les séismes ou les éruptions volcaniques, et il montre une sensibilité extrême à l'empreinte des sociétés humaines, elles-mêmes dépendantes du climat. Quels que soient les emboîtements d'échelles spatiales et/ou temporelles, et tout comme pour la variabilité climatique, l'action anthropique modifie, à des fréquences variables mais somme toute rapides, les états de surfaces et donc les processus d'altération et d'érosion qui les affectent. À leur tour, la variabilité et l'intensité de la fréquence de ces processus modulent la libération de matière ou d'énergie transportés latéralement (en plus des rejets

directs anthropiques) par les corridors fluviaux, eux même modifiés par les activités anthropiques, jusqu'aux réacteurs biogéochimiques et sédimentaires que sont les interfaces Terre-Mer. Ces interfaces Terre-Mer sont elles aussi fortement impactées par l'action anthropique ainsi que par la variabilité climatique, notamment par la hausse globale du niveau marin, l'augmentation de la température des océans, l'accroissement de la salinité, et l'augmentation des événements extrêmes (tempêtes) dans certaines régions, conduisant d'une part à l'érosion et donc la modification du trait de côte et de l'interaction Terre-Mer, et d'autre part à une augmentation des flux de la mer vers la Terre.

À l'instar du transfert latéral, l'impact des changements globaux sur le transfert vertical, c'est à dire les échanges de matière et d'énergie entre atmosphère, surface et sous-sol (dont la distribution spatiale des roches, l'intensité dans le temps et l'espace des contraintes tectoniques favorisant le relief sont dépendants du contexte géodynamique), est également prégnant, et ce pour les mêmes raisons. En effet, toujours modulé ou exacerbé par la variabilité climatique, un changement d'état de surface, regroupé sous l'anglicisme « Land Use and Land Use Change and Forestry » (LULUCF), perturbe ces échanges verticaux, aussi bien ascendants que descendants. Ainsi, une modification de la biosphère peut affecter directement les échanges gazeux (en particulier de carbone) avec l'atmosphère, ou le travail du sol modifie l'infiltration et donc les chemins de l'eau.

Il n'est donc pas surprenant que le CTM s'inscrive dans : i) de nombreux enjeux et défis sociétaux comme la gestion des ressources (e.g. eau, trophique, biodiversité ; cf. chapitre « Stocks & Ressources naturelles » p. 60) ou le recul du trait de côte, ii) les problématiques environnementales (e.g. pollution), ou iii) la compréhension du cycle biogéochimique du carbone. Plusieurs questions scientifiques ressortent, dont certaines recourent celles de la prospective précédente (cf. chapitre « Bilan de la dernière prospective ») p. 12 : i) identification des puits de carbone et leur efficacité le long des corridors fluviaux et aux interfaces, ii) intégration du cycle du carbone à l'échelle des continuums, iii) dynamique des échanges gazeux (e.g. CH<sub>4</sub>) à l'interface des écosystèmes terrestres et aquatiques, iv) la variabilité des flux de matières et solutés (incluant les contaminants) sous forçage anthropiques (usage des sols) et climatiques (y compris événements extrêmes), en intégrant des scénarios prédictifs pour les prochaines décennies, v) filtrage des signaux climatiques par les propriétés internes des bassins versants qui altèrent l'expression du signal climatique sur les flux hydriques, vi) impact (e.g. biogéochimique) des apports marins aux interfaces (écosystèmes, cycle biogéochimique, sociétés humaines), vii) rétro-observation permettant de restituer les trajectoires des bassins versants ainsi que celles des écosystèmes pour raffiner les modèles prédictifs.

## Variabilité des flux de matières sous contraintes anthropiques et climatiques

Cette question fait écho à celles, plus spécifiques, portant sur le carbone (cf. section dédiée au cycle du carbone p. 42). Il est primordial de poursuivre les efforts en cours sur les observatoires SIC en renforçant la quantité des mesures haute fréquence, qu'il s'agisse d'améliorer les méthodes actuelles (e.g. estimation des flux particulaires sur des rivières peu chargées), ou de les harmoniser (dosage du C), tout en synthétisant les données existantes. La compréhension de cette variabilité spatiale et temporelle doit intégrer les effets des forçages climatiques, anthropiques et géomorphologiques sur ces flux. Les deux premiers forçages nécessitent un décloisonnement avec les communautés OA et SHS; ce qui constitue une priorité majeure pour des prochaines années. Dans une démarche de rétro-observatoire, la communauté SHS peut fournir un cadre spatial et temporel des aménagements passés dépendants de variables sociales et économiques, et ainsi contribuer à caractériser des « hot-spots et hot moments » et/ou points de bascule de ces grands changements (e.g. remembrement des surfaces, construction des barrages, etc.). Ces rétro-observatoires, basés sur l'analyse d'archives sédimentaires ou de chroniques de données, sont indispensables pour reconstituer des empreintes anthropiques et climatiques et établir les trajectoires des différents objets étudiés dans les bassins versants. Couplée avec une approche 'paléo' propre aux SIC, l'interaction avec la communauté OA, en particulier autour de la physique du climat, est essentielle pour comprendre l'impact de ce forçage sur les flux de matière, notamment pour prévoir les événements climatiques extrêmes et aborder les différentes échelles

spatiales (up and downscaling). Enfin le forçage géomorphologique est abordé dans la question posée par la communauté SIC à travers l'examen du rôle du filtrage des signaux climatiques par les propriétés internes des bassins versants, incluant le mode d'occupation des surfaces, qui modifient ou altèrent l'expression du signal climatique sur les flux de matières. Ceci implique, par exemple, d'effectuer des tests de sensibilité à l'échelle des bassins versants, de modifier certains paramètres propres à la géomorphologie quantitative et d'examiner l'impact de ces propriétés internes sur les flux de matière. L'intégration de l'ensemble de ces communautés et des démarches scientifiques associées (basée sur l'observation, la rétro-observation, voire l'expérimentation) permettra, via le chaînage de modèles géomorphologique, climatique et socio-économique, de prévoir ces flux pour les prochaines décennies. Ici encore, l'apport de l'IA sera crucial pour affiner les critères de performance des modèles et identifier des processus non apparents dans l'analyse des données.

## Quantification des flux et processus aux interfaces Terre-Mer

Les interfaces Terre-Mer sont des environnements clés, particulièrement sensibles aux changements globaux, qui modifient les flux de matière provenant des surfaces continentales, mais aussi ceux d'origine marine, notamment via la hausse du niveau marin et



Exemple d'interface surface continentale-océan. Décharge sédimentaire à l'interface Terre Mer liée à une crue dévastatrice du Var lors de l'épisode méditerranéen d'Octobre 2020 imputable au passage de la tempête Alex.  
© EU - Copernicus Sentinel data



l'intensification des extrêmes hydro-climatiques. Des phénomènes associés, tels que le recul du trait de côte, sont exacerbés localement par la diminution des apports continentaux, en grande partie liée à la rupture de la continuité sédimentaire induite par les aménagements anthropiques. Les contributions recueillies montrent qu'il est nécessaire de mieux quantifier les effets combinés de ces aménagements et de la hausse du niveau marin sur l'évolution du trait de côte (c'est-à-dire l'érosion du littoral) à différentes échelles spatiales et temporelles. Ainsi, le besoin d'observation à fin maillage est indispensable et doit être poursuivi (e.g. imagerie spatiale, capteurs, mission SWOT, utilisation de drones). Tout en intégrant l'impact croissant des événements extrêmes continentaux (crue) et météo-marins (tempête), ces observations devront être couplées avec de la modélisation et de l'IA pour assembler les modèles de transports de matière au sein du CTM avec ceux couramment utilisés par les modélisateurs de l'hydrodynamisme et de la dynamique sédimentaire propre à ces milieux. Associée à ces observations et à cette modélisation, l'expérimentation (e.g. en mésocosme) est également essentielle pour comprendre les processus actifs dans la colonne d'eau, telle que la floculation vs. défloculation, qui jouent un rôle crucial dans la capacité d'un estuaire à stocker de la matière (sédiments, nutriments, contaminants, carbone) et la stabilité des écosystèmes ou l'équilibre des cycles biogéochimiques. De même, à l'interface eau/sédiment, et bien que cette interface soit un objet classique d'étude pour les SIC, il sera nécessaire de poursuivre nos actions sur la modélisation des flux biogéochimiques en se focalisant davantage sur les paramètres physico-chimiques (gradient Eh/pH) et sur la compréhension des processus biotiques et abiotiques avec notamment l'impact des communautés de microorganismes sur ces échanges.

La hausse du niveau marin implique une rétrogradation des environnements, se manifestant par des intrants marins pouvant affecter la biogéochimie, en particulier sous la forme de perturbations ou changements d'équilibre irréversibles dans les cycles des nutriments, les écosystèmes, incluant la dynamique de la faune, la flore, les microorganismes, ainsi que leur vulnérabilité, leur résilience et leur rétrogradation, avec les nécessaires changements d'usage des sols associés. Cette hausse impacte également les sociétés humaines qui se sont développées sur les cours inférieurs des fleuves (plaine alluviale) et qui dépendent des ressources offertes par ces interfaces. Parmi ces ressources, les aquifères en connexion avec l'interface Terre-Mer sont très sensibles aux apports d'eau marine. Nos actions devront s'intéresser à la quantification de ces flux d'origine marine, à la variabilité de leur intensité à différentes échelles spatiales en lien avec le changement climatique et en tenant compte des événements extrêmes. Il s'agira notamment de suivre la mobilité de cette interface aquifère-mer, influencée de façon croissante par les épisodes de sécheresse sur le continent, qui modifieront les gradients hydrauliques et, par conséquent, le déplacement de cette frontière.

En insistant sur une démarche de colocalisation, il est essentiel de poursuivre, voire de densifier, le développement des observatoires installés sur ces interfaces. Ces observatoires, encore peu nombreux, sont indispensables pour quantifier les échanges de matière et appréhender les processus physico-chimiques et sédimentaires qui les accompagnent. Là encore, des démarches d'expérimentation et de modélisation (cf. paragraphe précédent) sont à prescrire. Associées à des mesures classiques de paramètres physico-chimiques, les méthodologies non-invasives comme les prospections géophysiques de subsurface, sont attendues pour suivre le déplacement latéral de cette interface.

### Le cycle du carbone dans le continuum hydrologique Terre-Mer (CHTM)

La communauté souligne l'importance d'étudier le cycle du carbone, des têtes de bassins versants jusqu'aux interfaces Terre-Mer. Trois questions, intimement liées, ont été soulevées :

**Quels sont les puits de carbone, et quelle est leur efficacité le long des corridors fluviaux et aux interfaces ?** Pour réduire les émissions de carbone atmosphérique, un levier possible est d'améliorer l'efficacité des puits de carbone, ce qui implique de les caractériser finement. Les réseaux hydrographiques, qui jouent un rôle dans le transfert et la séquestration du carbone, sont encore peu étudiés, notamment en raison de l'impact des aménagements anthropiques. Les projets soutenus par le PEPR FairCarboN ne les prennent en compte que partiellement, faute de moyens. Pour progresser, il est nécessaire d'adopter une approche holistique et interdisciplinaire, incluant notamment la sédimentologie, la géochimie, la géophysique de surface, et l'histoire des aménagements fluviaux. Cela doit s'appuyer sur les observatoires et rétro-observatoires, en analysant les archives sédimentaires pour comprendre la dynamique et l'efficacité de la séquestration du carbone sur le long terme. Les recherches peuvent s'appuyer sur des méthodes de haute résolution, comme l'imagerie hyperspectrale qui peut être couplée à l'IA pour le traitement des données d'observation *in situ* ou de télédétection, des méthodes d'investigation non-invasives pour définir la dimension des puits (e.g. géophysique de sub-surface), et intégrer des modèles géomorphologiques et du cycle du carbone dans les hydrosystèmes.

**Comment intégrer le cycle du carbone à l'échelle du continuum et des interfaces Terre-Mer ?** Le PEPR FairCarboN souligne des lacunes dans l'observation, la synthèse des données et la modélisation des flux de carbone, qu'ils soient particuliers ou dissous, dans le continuum hydrologique Terre-Mer. Bien que certains projets lauréats tentent de combler ces lacunes en se concentrant sur des environnements critiques comme les lacs, les estuaires, les mangroves, et les forêts, les actions spécifiques au CTM, notamment les corridors fluviaux, restent limitées. Le projet ciblé CarboNium soutenant les infrastructures de recherche comme OZCAR et ZA s'intéresse à la dynamique du carbone dans le continuum terrestre-aquatique. Il vise à synthétiser

les données existantes, à densifier les observations de flux à haute fréquence, à harmoniser les protocoles de mesure du carbone et à développer un chaînage de modèles pour mieux comprendre le cycle du carbone. Le PEPR FairCarboN doit servir d'incubateur pour d'autres initiatives plus spécifiques en collaboration avec les communautés OA et SHS. Le décloisonnement de ces communautés est crucial pour une compréhension et une intégration approfondie du cycle du carbone à l'échelle du CTM et des interfaces Terre-Mer. Les SHS permettront de restituer l'impact anthropique sur les systèmes étudiés comme les aménagements passés et futurs, la gestion des surfaces et le couplage de nos modèles avec des modèles socio-économiques, et ainsi quantifier l'impact de ce forçage sur le cycle du carbone et sa projection future. La communauté OA apportera son expertise aux interfaces Terre-Mer-atmosphère, notamment sur les processus biogéochimiques, hydrodynamiques et

sédimentaires. Il sera essentiel de coupler différents modèles propres aux SIC (transferts latéraux dans les bassins versants) avec ceux utilisés par la communauté OA aux interfaces Terre-Mer, en particulier les modèles visant à simuler l'hydrodynamique et la redistribution des sédiments au niveau de l'océan côtier, en tenant compte de la hausse du niveau marin. La communauté OA est également sollicitée pour les échanges gazeux (e.g. méthane) avec l'atmosphère, où des questions demeurent sur la dynamique de ces échanges à l'interface des écosystèmes terrestres et aquatiques, et plus généralement sur la modélisation du climat. Ces questions intègrent à la fois une quantification spatialisée de ces échanges (quels paramètres? Quels capteurs? Quels outils comme le LIDAR terrestre mobile? Quelle fréquence de mesures? Quelle densification du réseau de tours à flux?) et leur modélisation selon différents scénarios climatiques et anthropiques, qui peuvent



Exemple d'interface biotique-abiotique. Têtard se nourrissant sur une interface biotique/abiotique, le biofilm, interface entre une surface dure (pierre) et la colonne d'eau. Le biofilm est un mini-écosystème, hébergeant une série d'espèces différentes au sein d'une matrice. La matrice du biofilm est une riche source de nutriments (sucres et protéines) pour le têtard, ce qui est particulièrement important dans les écosystèmes aquatiques pauvres en nutriments, tels que les lacs de montagne alpins et subalpins. Dans ces écosystèmes, l'accumulation et le stockage des nutriments, résultant des interactions entre la colonne d'eau et les différentes espèces du biofilm, sont de la plus haute importance pour les espèces animales et végétales.

© Dirk SCHMELLER / CRBE

être améliorées par des approches d'apprentissage automatique. Enfin, nos investigations devront porter sur l'impact des événements climatiques extrêmes, mais aussi anthropiques, sur ces flux qu'ils soient particuliers, dissous ou gazeux (et donc sur le stockage de carbone).

## Interfaces biotiques/abiotiques

L'interface entre les processus biotiques et abiotiques représente la zone de contact entre un organisme vivant ou un matériau organique considéré comme vivant et un biomatériau ou un matériau inorganique/organique. Ces interfaces, essentielles car elles décident des interactions entre les organismes et leur environnement, affectent les processus écologiques, la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes. Elles jouent un rôle crucial dans les cycles biogéochimiques, comme ceux du carbone, de l'azote, du phosphore et des contaminants organiques et inorganiques, et séparent les gradients de nutriments réversibles des gradients d'altération chimique dans les sols. Elles sont indispensables à l'habitabilité de la Terre, purifiant l'air, fournissant de l'eau potable et rendant les nutriments biodisponibles. Cependant, leur fonctionnement et leur rôle dans la fourniture de molécules essentielles restent mal compris. Ces interfaces peuvent rapidement modifier les processus écosystémiques en raison des changements climatiques, saisonniers et anthropiques.

L'évaluation de la manière dont les interfaces sont affectées par le changement climatique, y compris les changements de température, les régimes de précipitations et les phénomènes météorologiques extrêmes, peut aider à prévoir les réactions des écosystèmes au changement climatique et à élaborer des stratégies d'adaptation et d'atténuation. Les progrès dans notre compréhension des interfaces biotiques/abiotique contribueront à des avancées importantes dans les domaines des sciences environnementales, de la biologie, de la biotechnologie, des diagnostics humains et animaux et des sciences médicales. La recherche sur les interfaces biotiques/abiotique nécessite une approche interdisciplinaire, combinant les domaines biologique, chimique, physique et écologique, ainsi que des approches analytiques couplées.

Plusieurs grandes questions structurant la recherche future sur ces interfaces ont été identifiées :

**Quels sont les processus qui contribuent aux cycles biogéochimiques des éléments, des isotopes ou des molécules et quelles sont les voies réactionnelles qui déterminent les flux et les équilibres ?** Les cycles biogéochimiques sont des réseaux complexes dans lesquels des éléments, des isotopes et des molécules se déplacent dans les sphères de la Terre (atmosphère, hydrosphère, lithosphère et biosphère) et impliquent des interfaces biotiques/abiotique. Plusieurs processus contribuent à ces cycles, impliquant diverses voies réactionnelles qui déterminent les flux et les équilibres de ces éléments et de leurs isotopes. Les processus connus dans les interfaces biotiques/abiotique qui contribuent

aux cycles biogéochimiques comprennent notamment la photosynthèse et la respiration, la décomposition, l'absorption et l'assimilation des nutriments, la nitrification et la dénitrification. Les voies réactionnelles qui déterminent les flux et les équilibres comprennent i) les réactions d'oxydoréduction, l'oxydation de la matière organique couplée à la réduction de l'accepteur terminal d'électrons tel que l'oxygène, le nitrate ou le sulfate (respiration) par les microbes, et ii) la fixation biologique, c'est-à-dire, par exemple, la conversion de l'azote atmosphérique ( $N_2$ ) en formes biologiquement utilisables telles que l'ammoniac ( $NH_3$ ) par les procaryotes ou la fixation du  $CO_2$  par les organismes autotrophes. Ces processus biologiques s'inscrivent dans des cycles biogéochimiques plus vastes et créent des réseaux complexes de réactions qui contrôlent la distribution, le flux et l'équilibre des éléments, des isotopes et des molécules dans les différents systèmes terrestres. L'avancement de la recherche dans ce domaine nécessite des efforts accrus pour intégrer les données provenant d'observations sur le terrain, de la télédétection et de la modélisation pour améliorer notre compréhension des processus biogéochimiques à différentes échelles spatiales et temporelles. En raison du caractère ubiquiste des cycles biogéochimiques, les collaborations internationales et le partage des données sont essentiels pour faire progresser la recherche et relever les défis environnementaux mondiaux. Exploiter les avancées technologiques, telles que le séquençage à haut débit et les techniques de traçage isotopique ou l'approche « holobionte » peuvent améliorer notre capacité à comprendre et modéliser les processus biogéochimiques aux résolutions et précisions nécessaires.

### Comment les processus abiotiques et biotiques sont-ils couplés ?

Les processus abiotiques et biotiques sont étroitement interconnectés dans les cycles biogéochimiques, chacun influençant et régulant l'autre de manière dynamique. Ces processus biotiques et abiotiques couplés jouent un rôle crucial dans les cycles des nutriments. La compréhension des mécanismes de couplage reste limitée, ce qui restreint notre capacité à comprendre comment les cycles biogéochimiques maintiennent l'équilibre des éléments essentiels, soutiennent la vie et influencent les conditions environnementales à l'échelle globale. Il est donc nécessaire de progresser dans notre compréhension des boucles de rétroaction entre les processus biotiques et abiotiques, de la modulation environnementale par la température, le redox, le pH et les niveaux d'humidité qui affectent les processus biotiques comme l'activité microbienne et la croissance des plantes, les changements induits par l'activité humaine, incluant l'agriculture, la déforestation, la combustion de combustibles fossiles qui modifient le cycle du carbone et de l'azote, et les transformations élémentaires incluant la transformation microbienne de la matière, des formes inorganiques aux formes organiques et vice-versa. Un aspect encore peu étudié concerne certains couplages entre processus abiotiques et biotiques. En particulier, les interactions et synergies entre processus de dégradation biotique (minéralisation de la matière organique par

voie biologique) et abiotique (photo-oxydation et auto-oxydation, dismutation etc.) qui jouent un rôle clef lors de la synthèse *de novo* de matière organique, restent sous-explorées.

**Comment la diversité génétique, taxonomique, métabolique et fonctionnelle contribue-t-elle au fonctionnement des écosystèmes ?** La diversité génétique, taxonomique, métabolique et fonctionnelle est essentielle au fonctionnement des écosystèmes, contribuant à leur résilience, leur productivité et leur stabilité. Une plus grande diversité génétique au sein des espèces améliore leur capacité à s'adapter aux changements environnementaux, tels que les fluctuations climatiques, les maladies et les modifications de l'habitat, garantissant ainsi leur survie. Cependant, l'effet de la diversité génétique sur le fonctionnement des interfaces biotiques/abiotiques et les processus associés sont souvent peu connus. Les processus incluent l'augmentation de la diversité génétique par l'augmentation du nombre de variants de séquences d'amplicons (ASV) et d'unités taxonomiques opérationnelles (OTU), l'augmentation du nombre de métabolites produits ; ce qui peut affecter les interactions interspécifiques à l'échelle microbienne et améliorer les performances des espèces supérieures par des effets physiologiques (e.g. dans les intestins). La diversité fonctionnelle, alimentée par la diversité métabolique, agit sur le fonctionnement global des écosystèmes, rendant possiblement ces derniers plus stables et productifs. La diversité affecte également la complémentarité des niches écologiques, assure une redondance fonctionnelle et stabilise les interactions trophiques, rendant les écosystèmes plus résistants et résilients face aux perturbations. Enfin, un éventail diversifié d'espèces contribue à des réseaux trophiques complexes, qui peuvent stabiliser le flux d'énergie et le cycle des nutriments, rendant l'écosystème plus résistant aux perturbations. La diversité métabolique, au sein des espèces et entre elles, contrôle également le fonctionnement des écosystèmes. Cependant, bien que les bases du cycle des nutriments et des processus de décomposition et de transformation soient bien comprises, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour explorer les capacités métaboliques des microorganismes dans ces processus, qui sont cruciales pour la décomposition complète des matières organiques et inorganiques, y compris les polluants, les cycles des nutriments, la fertilité des sols, et plus globalement, la santé et à la résilience de l'écosystème.

Finalement, les diversités génétique, taxonomique, métabolique et fonctionnelle sont également étroitement liées : la diversité génétique soutient la diversité taxonomique en permettant l'adaptation et la survie des espèces. La diversité taxonomique renforce la diversité fonctionnelle en fournissant un large éventail d'espèces ayant des traits et des rôles différents. La diversité fonctionnelle est alimentée par la diversité métabolique des organismes, en particulier des microorganismes, qui remplissent diverses fonctions biochimiques. L'interaction entre les différents niveaux de diversité reste cependant peu étudiée malgré son importance pour la productivité,

la résilience et la santé des écosystèmes et en ce qui concerne la durabilité des processus et les services écologiques essentiels.

**Comment les contraintes environnementales influencent-elles les interfaces biotiques/abiotiques, leur diversité et le fonctionnement des écosystèmes ?**

Les contraintes environnementales telles que la température, la disponibilité de l'eau, les concentrations de nutriments, la lumière et l'espace physique influencent considérablement les interfaces biotiques/abiotiques, leur diversité et leur fonctionnement. Par exemple, la température affecte les taux métaboliques, la croissance, la reproduction et la survie des organismes, ce qui affecte l'activité enzymatique et les processus physiologiques. Des températures extrêmes peuvent altérer l'équilibre entre la photosynthèse et la respiration, affectant ainsi le cycle du carbone et les flux d'énergies. De même, la disponibilité de l'eau influence la photosynthèse, la respiration et la transpiration, affectant ainsi la richesse des espèces, la structure des communautés et le cycle des nutriments. Des recherches sont nécessaires pour comprendre l'impact des régimes hydrologiques et thermiques, de plus en plus altérés par les activités anthropiques et le changement climatique, sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes, incluant les cycles et les déséquilibres des éléments nutritifs. La structure physique des habitats joue également un rôle crucial dans la répartition et les interactions des espèces, avec des paysages hétérogènes favorisant la biodiversité, tandis que la fragmentation des habitats peut réduire la diversité génétique et augmenter la vulnérabilité des écosystèmes. Comprendre ces interactions permet de mieux gérer et de conserver les écosystèmes face aux changements environnementaux.

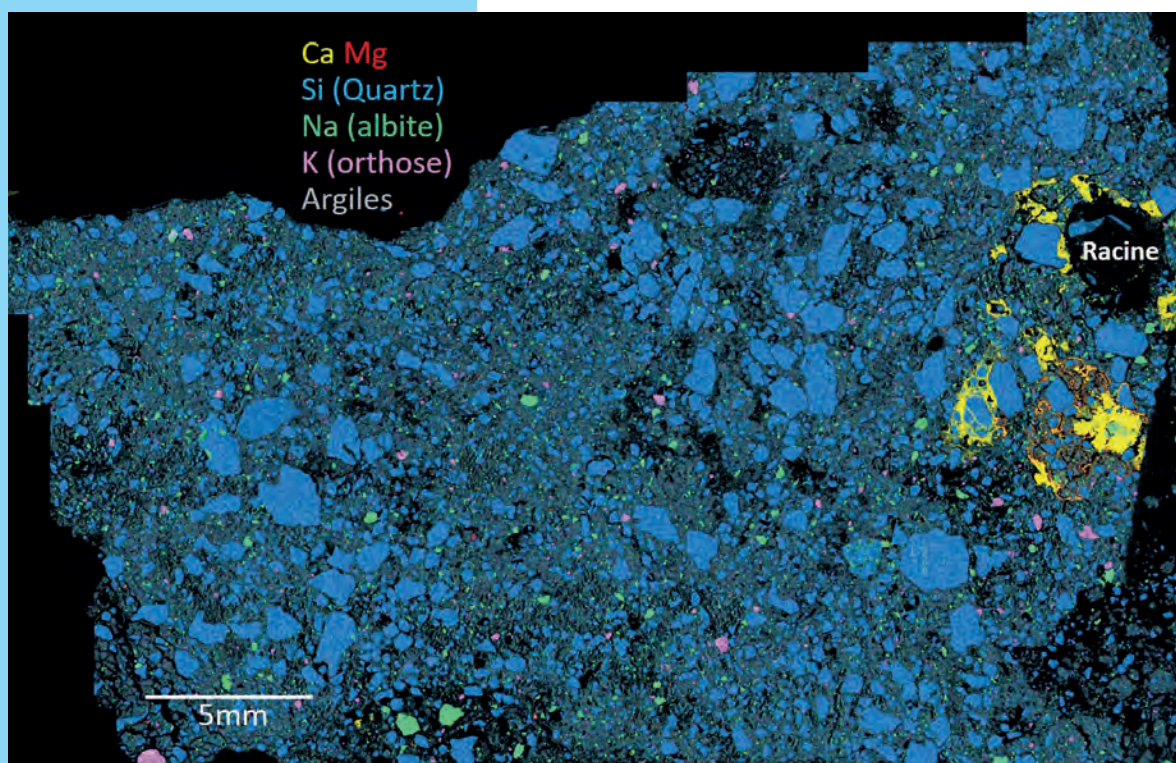
## Recommandations

Les recommandations concernent les ressources humaines, les grands programmes à venir, la mise en place de plateformes et l'évolution des systèmes d'observation. S'agissant des ressources humaines, il est crucial de renforcer les nouvelles compétences techniques (e.g. IA) recherchées par la communauté SIC (e.g. automatisation assistée par IA, création de banque de données, etc.) tout en modernisant celles en déclin (e.g. palynologie, pédologie, pétrographie organique, etc.). Une évaluation de nos besoins en métiers rares et originaux ainsi que des savoirs faire propres à notre communauté est urgente pour les préserver et les développer (cf. chapitre « Formations — Métiers — Compétences » p. 134). Par ailleurs, un réel besoin a été souligné concernant l'existence et la pérennité d'une communauté scientifique interdisciplinaire et spécifique pour répondre aux enjeux et défis des territoires d'Outre-mer.

Par manque de financement et de ressources humaines, la fragilisation des suivis des observatoires représente un risque majeur. Il est indispensable de poursuivre i) l'acquisition de mesures en continu sur le long terme (e.g. pérennisation de personnel technique et diminution des biais dans les enregistrements) en la densifiant (processus en cours grâce aux initiatives amorcées dans les PEPR comme les dispositifs de tours à flux, imagerie satellite haute résolution et méthodologies aéroportées), et ii) l'harmonisation des protocoles analytiques à l'échelle nationale qui devront s'accorder avec ceux des observatoires eLTER. Nos systèmes d'observation

Exemple d'hétérogénéité à petite échelle. Lame mince (4x2.5cm) de sol traversé par une racine fine à 9m de profondeur. Les racines fines prélèvent l'eau et les nutriments pour les plantes, contrairement aux racines de taille supérieure qui ont une fonction de transport (et de maintien). Dans le cas présent l'activité racinaire, et en particulier le prélèvement d'eau, a conduit à la sursaturation de l'eau porale vis à vis de carbonates et leur précipitation sous deux formes: une prise en masse calcitique (en jaune) sur le pourtour du conduit racinaire et un tapissage dolomitique de la macroporosité localisé à l'écart (en orange) et vraisemblablement d'origine bactérienne (Inde, ANR Nutrilift). Dans ce contexte, l'activité racinaire profonde contribue donc à piéger, potentiellement sur plusieurs dizaines de milliers d'années, du carbone sous forme inorganique.

© Jean RIOTTE / GET



devront se renforcer par l'utilisation de capteurs low-cost compatibles avec les systèmes d'acquisition et fonctionnels dans un spectre large de conditions et milieux, incluant les extrêmes. Il existe encore des milieux critiques, comme les interfaces Terre-Mer, pour lesquels les observatoires sont insuffisants. Il est donc urgent de s'interroger sur la nécessité d'en créer davantage, tout en engageant les moyens humains et financiers nécessaires. La compréhension des géo-bio-hydrosystèmes reposent sur une démarche colocalisée intégrant observation *in situ* et télédétection, expérimentation, modélisation ainsi que des méthodes et disciplines variées depuis la physique, la chimie, les géosciences et la biologie. Par exemple, un renforcement sur le couplage de techniques propres à la géophysique, l'hydrologie, la biogéochimie mais aussi la biologie est attendu pour caractériser les hétérogénéités spatiales et temporelles mais aussi les flux et les stocks de matière de la Zone Critique. Enfin les analyses devenant de plus en plus complexes et chronophages, leur résolution et interprétation devra s'appuyer sur l'utilisation de méthodes d'apprentissage (IA) (cf. chapitre « Données en SIC » p. 104). Les communautés OA, TS et SHS peuvent être rapprochées *via* des observatoires communs, des AAP communs (comme LEFE-EC2CO), des projets soumis à une évaluation unique, ou *via* des écoles d'été et des cycles de conférence communs. **Les recommandations concernant les analyses et les renforcements techniques** portent sur les techniques de préparation des échantillons, lorsque ceux-ci sont analysés par plusieurs équipes pour des objectifs de recherche différents. Il faut bancaiser les données issues de techniques *in situ* afin de contraindre et de valider les produits dérivés de la télédétection. Un besoin exprimé en recherche sur les interfaces est de renforcer les plateformes omiques à haut débit associées à du personnel qui puissent les gérer (UAR) car les plateformes individuelles ne peuvent pas traiter le grand nombre d'échantillons que la recherche moderne promeut. Ainsi et par exemple, il sera nécessaire d'utiliser des techniques-omiques pour augmenter la résolution taxonomique et la compréhension fonctionnelle des microorganismes (e.g. ADNe, approche holobionte). D'autres besoins émergent, plus spécifiquement aux interfaces, où la mise en place d'expériences en mésocosme pour évaluer les processus de floculation / défloculation est nécessaire et comprendre la dynamique sédimentaire pour alimenter les modèles de transfert de sédiments dans les estuaires macrotidaux (bouchons vaseux).

Un besoin déjà mentionné dans la prospective précédente concerne **les outils de modélisation** dans le contexte du changement global. Depuis les têtes de bassin versant jusqu'aux interfaces Terre-Mer, la compréhension et la modélisation des transferts verticaux et latéraux de matière devra nécessairement intégrer un chaînage de modèles incluant les modèles i) d'érosion, transport, dépôt, ii) biogéochimiques, iii) diagénétiques, iv) hydrologiques, v) écologique, mais aussi ceux propres aux interfaces Terre-Mer comme les modèles hydrodynamiques (submersion marine). Il faudra affiner les modèles, notamment ceux

appliqués aux surfaces continentales, en intégrant la notion des réserves d'eau utile afin de mieux représenter les processus de transpiration, notamment en période de sécheresse. À ces modèles, qu'il faudra tenter d'homogénéiser, voire de coupler, et dont la sensibilité doit être déterminée, ceux propres aux échanges terre solide/surface, surface/atmosphère, climatiques (OA) mais aussi SHS (économique, sociologie et géographie sociale en particulier) devront être considérés. Les données de sorties des modèles issus de ces deux dernières disciplines (OA et SHS) serviront de données d'entrée à nos modèles physiques. Plus particulièrement, les modèles climatiques incluant les simulations des événements extrêmes qui impactent fortement l'intensité et la variabilité des flux de matière, seront à privilégier. Pour les modèles associés aux SHS, il s'agira d'intégrer la modélisation des systèmes socio-économiques afin d'établir des scénarios d'impact des sociétés humaines (et leur trajectoire) sur les échanges de matières et évaluer la vulnérabilité et la résilience des hydrogéosystèmes. Cela souligne l'importance d'impliquer les SHS dans nos observatoires, en particulier sur ceux propres à l'INSU (car CNRS Écologie & Environnement, *via* les ZA, les impliquent déjà). Enfin, la création de modèles hybrides, consistant en la combinaison de nouveaux outils basés sur l'IA avec nos modèles à base physique, en particulier ceux propres aux transferts de matière, afin d'en améliorer la performance, est attendue (cf. chapitre « Données en SIC » p. 104).

D'autres recommandations concernent davantage les aspects administratifs et l'organisation fonctionnelle. D'un point de vue strictement territorial, un soutien au découplage faciliterait les démarches administrative des observatoires, comme celles des ZA situées entre différentes entités administratives. S'agissant du volet administratif propre à l'INSU-SIC, il y a un réel besoin de simplification de l'administration et des procédures associées en particulier pour le financement des collègues étrangers dans le cadre des projets ANR et EC2CO. Nous saluons la simplification des démarches administrative lors des retours des missions, avec la mise en place d'un forfait sans justificatif. Enfin, il faut poursuivre l'effort de recensement des services analytiques dans les laboratoires par l'IR RéGEF (cf. chapitre « Bilan de la dernière prospective » p. 12).

# Intégration des différentes échelles d'espace et de temps dans l'étude des SIC



Les développements technologiques rapides des dernières décennies ont permis d'étendre les gammes d'échelles spatiales pour observer et modéliser les SIC. Cela va du développement et du gain en résolution des techniques synchrotron et d'imagerie aux nano-échelles jusqu'à l'accessibilité et la résolution croissantes des instruments de télédétection pour l'observation aux échelles régionales et globales. Parallèlement, l'intérêt de la profondeur temporelle passée pour appréhender la dynamique des processus régissant l'évolution passée et actuelle des SIC est aujourd'hui évident, comme l'a récemment montré le livre blanc paléoclimats et paléoenvironnements (INSU, 2024). Plusieurs programmes nationaux (ANR, EC2CO, MITI) intègrent dans leurs AAP les reconstitutions paléo-environnementales comme outil de mise en perspective du présent et de comparaisons spatiale et temporelle, afin d'évaluer les modèles prédictifs. Le développement de nouveaux marqueurs paléo-environnementaux quantitatifs et la diversification des méthodes de datation sont également encouragés.

La plupart des études d'observation et de modélisation restent toutefois centrées autour d'expertises disciplinaires de pointe permettant de renseigner une échelle unique. L'intégration pluri-échelles (de temps et d'espace) implique nécessairement plusieurs champs disciplinaires et reste un enjeu crucial. Cette intégration est en effet fondamentale pour produire des clés de compréhension généralisables mais aussi des outils utilisables non seulement par la communauté SIC mais aussi par les acteurs non académiques (e.g. public, éducation, industrie, agriculture, aménagement, politique, etc.) pour appréhender et gérer les territoires. Cela nécessite de faire travailler ensemble des communautés qui évoluent en parallèle, mais partagent encore peu leurs données, leurs approches conceptuelles et de modélisation.

Dans ce chapitre, la réflexion sur l'intégration des différentes échelles d'espace et de temps dans l'étude des SIC est déclinée autour de 3 thèmes :

- Intégrer et combiner les échelles de temps.
- Intégrer et combiner les échelles d'espaces.
- Gérer la complexité (hétérogénéités spatiales et temporelles) dans les modèles.

## Les enjeux

### Intégrer et combiner les échelles de temps

Des collaborations entre communautés TS, OA et SIC, mais aussi entre INSU, CNRS Écologie & Environnement et CNRS Sciences Humaines & Sociales se créent pour appréhender l'évolution des SIC au cours des périodes pré-quaternaires et quaternaires, Holocène et Anthropocène, et relier ces évolutions aux forçages climatiques et anthropiques (e.g. population, réglemmentation, etc.). Les enregistrements peuvent être continus ou discontinus en fonction des marqueurs eux-mêmes (e.g. ubiquistes ou pas, produits en continu ou au cours d'événements discrets, plus ou moins impactés par les processus taphonomiques, quantitatifs ou qualitatifs, etc) et de leur préservation (e.g. sédiments vs. tourbières vs. paléosols, géochimie

du milieu de préservation, caractéristiques des zones anthropo-éco-hydro-climatiques ciblées, etc.). Chaque enregistrement reste très ciblé et notre capacité à tracer en même temps les processus continus, les événements rapides, les impacts respectifs du changement hydro-climatique et de l'emprise anthropique, reste limitée. C'est pourtant cette combinaison qui façonne la Zone Critique. Si le développement des IR OZCAR et RZA a permis de rassembler différentes approches par sites, l'interdisciplinarité et la combinaison d'approches multi-échelles restent à renforcer.

### Intégrer et combiner les échelles d'espace

L'une des caractéristiques de la dynamique des SIC est

l'**emboîtement des échelles spatiales impliquées**. Les processus de transformation de la matière, organique ou inorganique, opèrent à l'échelle **moléculaire et cellulaire**, tandis que les transferts de matière ou d'énergie peuvent être quantifiés à l'échelle **régionale, continentale, voire globale**. Les observations à ces différentes échelles ne sont pas nécessairement concordantes, et les éventuels désaccords entre échelles peuvent être dus à des biais de méthode mais aussi à des « processus émergents » qui ne deviennent significatifs qu'une fois une certaine échelle atteinte. Élaborer des stratégies pour tester ces deux possibilités devient crucial dans l'étude des SIC et

demande de combiner des approches « petite échelle » (moléculaires, au laboratoire comme sur le terrain), des approches « de terrain » comme celles menées dans les observatoires, et des approches « globales » comme celles issues de la télédétection pour déterminer quels sont les facteurs contrôlant les processus étudiés aux différentes échelles spatiales. Enfin, l'emboîtement des échelles doit inciter la communauté à une réflexion profonde autour de la **détermination des paramètres clés** (e.g. volume élémentaire représentatif et temps caractéristique associé des processus étudiés, etc.) **permettant d'intégrer l'ensemble des échelles d'observation dans les modélisations**.

## Les questions scientifiques

### Intégrer et combiner les échelles de temps

Pour hiérarchiser les paramètres-clés de l'évolution des SIC et modéliser leur devenir, les changements d'état et les transitions, via l'identification des flux passés, doivent être caractérisés.

Dans cette perspective, **quelles périodes passées ayant des points communs avec l'évolution climatique actuelle et future doivent être privilégiées** : le Maximum Thermique du Paléocène-Eocène, la transition du Pleistocène Moyen, le MIS 5 (Marine Isotope Stage 5), les événements à 8.2 et 4.2 ka de l'Holocène, les derniers 4 ka ayant vu le développement de l'impact humain, d'autres périodes ?

Les transitions passées comprennent souvent des **points de bascule qu'il faut pouvoir identifier**.

- Quels sont les marqueurs dont la modélisation a besoin pour simuler les changements d'état et de flux qui précèdent et suivent ces points de bascule ?
- Quelles échelles de temps sont nécessaires pour identifier ces points de bascule ? Comment développer les reconstitutions aux échelles de temps « intermédiaires » (< 1000 ans) permettant la haute résolution temporelle ?

Les processus dits « courts » (e.g. processus bactériens, processus physico-chimiques en phase aqueuse, etc.) sont déterminants dans l'évolution de la Zone Critique.

- Comment les prendre en compte dans les enregistrements ?
- Comment intégrer ces processus évolutifs dans les modèles ?

L'ensemble de ces **processus évolutifs se combinent aux événements extrêmes**, par nature discontinus (e.g. crues, sécheresses, événements hydro-météo-marins de forte énergie, etc.).

- Comment mettre en rapport l'ensemble de ces enregistrements continus et discontinus ?
- Comment mettre en rapport les enregistrements actuels et passés des événements extrêmes ?

- Quels marqueurs paléo issus d'archives comparer aux mesures satellitaires (e.g. SWOT) haute fréquence des événements extrêmes actuels ?

Enfin, l'**Anthropocène** est défini comme la période où le **forçage humain** est devenu le forçage bio-géo-physico-chimique dominant face aux forçages naturels sur le système Terre.

- Quelle définition pour la période de l'Anthropocène (e.g. début de l'agro-pastoralisme, de l'industrialisation, etc.) ?
- À quelle période de référence comparer les enregistrements de l'Anthropocène ?
- Quels marqueurs de l'impact humain actuel et passé méritent d'être développés/combinés ?

### Intégrer et combiner les échelles d'espace

Le transfert d'échelle depuis les processus moléculaires jusqu'à l'échelle (centimétrique) des échantillons reste une question majeure pour les SIC. De plus, il nécessite une meilleure prise en compte des transformations de la matière minérale (e.g. nucléation, croissance cristalline, dissolution, re-précipitation, etc.) et organique (e.g. stabilisation du carbone organique). Enfin aux échelles encore plus larges, il est essentiel de **continuer à développer des méthodes d'analyse de la représentativité des images et des modèles**.

- Quel **continuum d'outils et de modèles pour relier les mécanismes élémentaires aux observations expérimentales** ?
- Comment améliorer la **compréhension des mécanismes moléculaires de croissance et d'altération des minéraux** ?
- Comment améliorer la compréhension et la **hiérarchisation des mécanismes de stabilisation du carbone organique**, en particulier dans les sols ?
- Comment mieux **intégrer l'information obtenue aux échelles inférieures dans les modélisations à grande échelle** (e.g. sol-végétation-atmosphère, bassins versants, dynamique sédimentaire, cycles géochimiques



Ouverture d'un sondage dans une tourbière du Parc Naturel de Karukinka, en Terre de Feu chilienne. Les chercheurs ont foré jusqu'à 4,5 m de profondeur pour obtenir une carotte renfermant les poussières déposées au cours des 8 000 dernières années. Ils ont ensuite étudié les teneurs en métaux de la carotte, grâce à des techniques de spectrométrie de masse, en particulier l'origine des isotopes de plomb : naturelle ou liée à l'activité humaine. Les résultats ont mis en évidence des augmentations de la teneur en cuivre, plomb et étain durant les périodes de développement des civilisations précolombiennes andines et l'origine minière de ces métaux. Les Incas ont par exemple exploité le cuivre et l'argent des sous-sols des Andes jusqu'au début du XVI<sup>e</sup> siècle. Les données indiquent aussi que les particules polluantes ont voyagé sur près de 4 000 km depuis leur lieu d'émission.

© Gaël LE ROUX / ECOLAB / CNRS Images

globaux, etc.) ?

- Comment tirer parti de la résolution accrue des données de télédétection dans les modèles numériques pour mieux intégrer l'ensemble des échelles spatiales ?

La question de l'intégration du compartiment vivant se pose également en termes d'échelles spatiales.

Cette intégration apparaît en particulier insuffisamment développée aux petites et mésoéchelles.

- Quelles sont les échelles les plus adaptées à l'étude de ce compartiment ?
- Comment étendre à l'échelle des écosystèmes l'étude de la diversité fonctionnelle basée sur les traits (utilisant le machine-learning et l'automatisation de l'identification) des systèmes bactériens, microbiens et viraux et leurs évolutions propres, ainsi que l'étude des mécanismes cellulaires ?
- Comment intégrer les interactions entre la variabilité environnementale et la dynamique des populations, incluant la distribution, l'acclimatation, l'évolution, etc. ?

## Gérer la complexité (hétérogénéité, non-linéarité) des SIC dans les modèles

Pour représenter à toutes les échelles d'espace et de temps les réactions chimiques (e.g. altération des roches, dégradation de la matière organique, etc.) dans la Zone Critique, il est nécessaire de prendre en compte dans les modèles i) les couplages entre ces différentes réactions

et ii) leur cinétique. Il s'agit de saisir les complexités des réactions en cours et d'explorer les trajectoires chimiques qui mènent à différents états d'équilibre ou hors équilibre. Cela mènerait à une meilleure prédiction des évolutions géochimiques et des interactions entre les processus physiques, chimiques et biologiques.

- Comment intégrer les mécanismes cinétiques pour modéliser plus précisément les systèmes environnementaux et explorer les chemins réactionnels menant à différents états d'équilibre ?

Les trajectoires complexes des écosystèmes soumis à des perturbations telles que le réchauffement climatique, la déforestation ou l'urbanisation, ne peuvent être saisies uniquement par des observations ponctuelles. Au delà de leur hétérogénéité intrinsèque, il est nécessaire, pour reconstituer ces trajectoires, de recourir à des approches de modélisation dynamique couplées à des archives paléoécologiques et à des données historiques et actuelles. Il est ainsi possible de reconstituer les changements passés et de prévoir les réponses futures des écosystèmes en réponse à des transformations rapides (e.g. résilience, capacité d'adaptation, etc.). Les réponses des écosystèmes peuvent inclure des seuils critiques ou des transitions brusques, difficiles à capturer dans les modèles actuels et l'intégration des phénomènes non linéaires (e.g. rétroactions positives et négatives) devient alors nécessaire pour mieux anticiper les réponses écologiques aux perturbations climatiques.

- Comment prendre en compte les réponses potentiellement non linéaires des écosystèmes aux changements globaux, incluant les événements climatiques extrêmes ?

# Forces et opportunités

## Intégrer et combiner les échelles de temps

- Comme pour l'ensemble des méthodes analytiques et expérimentales, l'amélioration et la diversification des méthodes de datation va permettre de préciser les enregistrements temporels et représentent donc une opportunité dans le domaine. À ce titre, la création de l'IR RéGEF constitue un cadre structurant pour le développement de ces méthodes à l'échelle nationale, en favorisant la collaboration entre différents acteurs et une meilleure intégration des méthodes existantes.
- L'utilisation et la combinaison de traceurs géochimiques (e.g. isotopes stables de l'eau - cf. SNO Renoir, analyse isotopique  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , etc.) permettrait par exemple de tracer les mouvements de l'eau souterraine sur des échelles de temps courtes et ainsi d'améliorer notre compréhension des cycles hydrologiques.
- L'utilisation de l'ADN environnemental (ADNe) pour reconstituer les faunes et flores passées est en pleine expansion, mais les clés d'interprétation et les processus

taphonomiques doivent être mieux compris pour en étendre le domaine temporel d'utilisation. Cela nécessite des études interdisciplinaires entre sédimentologues, géochimistes, biologistes et écologues (cf. chapitre « Données en SIC » p. 104).

- Les méthodes numériques (e.g. Big Data et IA) représentent également des opportunités à exploiter pour identifier des périodes cibles sur lesquelles combiner les enregistrements, corrélérer les données et, *in fine*, pour déterminer les marqueurs ou données paléo à comparer avec les données instrumentales actuelles.
- Les sites d'observation regroupés au sein des IR OZCAR et RZA et du réseau des OHM offrent un cadre favorable à la convergence de différentes approches méthodologiques visant à caractériser les échelles temporelles. Au sein de ces sites, les « rétro-observations » tirées des enregistrements sédimentaires, des paléosols ou des tourbières peuvent par exemple être mises en relation avec les flux et transformations actuels (e.g. comparaison entre la composition des sédiments anciens et celle des matières dissoutes

actuelles, Figure 1). Les initiatives de colocalisation d'observation des SIC actuelles et d'archives Holocène initiées au sein de l'IR OZCAR sont un exemple de ces opportunités à encourager. Cela permet de mieux comprendre l'évolution temporelle des écosystèmes et des processus géochimiques et ainsi de pouvoir en prédire le devenir.

## Intégrer et combiner les échelles d'espace

Aux petites échelles spatiales, la communauté SIC dispose d'un large éventail de techniques spectroscopiques et d'imagerie multi-échelles (e.g. STXM, MET, nanoSIMS, CTscan, etc.), en progression constante en termes de détection et de résolution (e.g. jouvence de l'ESRF, corrections d'aberrations, etc.). Par ailleurs, la modélisation moléculaire peut tirer parti des développements actuels dans l'intelligence artificielle, le machine-learning, la construction de potentiels interatomiques, l'échantillonnage accéléré et la prédiction de propriétés que ce soit pour permettre une interprétation approfondie des données expérimentales ou, en retour, pour développer la robustesse des prédictions. Pour développer un **continuum d'outils et de modèles** sur une gamme d'échelles allant du moléculaire à l'échantillonnage, plusieurs opportunités pourraient être saisies :

- Les **avancées récentes**, expérimentales et/ou numériques, **concernant la nucléation cristalline** (e.g. les voies « non classiques » et les clusters de prénucléation) représentent des pistes nouvelles et prometteuses pour affiner notre compréhension de ces processus abiotiques et leur intégration dans la prédiction des flux de matière dans les SIC.
- Les recherches en SIC pourraient également bénéficier des approches en **physique statistique** qui sont essentielles pour comprendre et intégrer les paramètres clés du changement d'échelle (e.g. discontinuités d'échelles, volumes élémentaires représentatifs). Les progrès en calcul, que ce soit **sur réseaux** ou des **jumeaux numériques**, pourraient également permettre d'affiner notre compréhension des échelles caractéristiques et leurs combinaisons pour étudier les processus complexes biotiques et abiotiques et leurs interactions.
- De la même manière, les **couplages mécanique/stochastique** aux échelles du pore et du continuum permises par les approches **micro-fluidiques**, ainsi que les progrès dans les méthodes numériques, offrent de nouvelles perspectives pour la compréhension des processus opérant à ces échelles mais également pour permettre d'accéder à des échelles plus grandes (e.g. parcelle, milieu hydrogéologique, etc.).

Dans une perspective de **transposition des informations obtenues aux petites échelles vers les grandes échelles**, les dispositifs expérimentaux déployés sur des sites instrumentés (e.g. IR OZCAR et RZA, OHM, etc.) offrent un cadre particulièrement favorable.

- À cet égard, l'émergence de l'IR eLTER au niveau européen constitue une opportunité que les scientifiques travaillant sur les SIC pourront pleinement exploiter.
- Par ailleurs, le développement, ou une meilleure utilisation, de campagnes de collecte de données à grande échelle (e.g. raids en régions polaires, transects latitudinaux, etc.) permettrait de **mieux documenter les bilans de masse dans ces régions éloignées**.
- Plus largement, les réseaux d'observation coordonnés, existants ou à créer, représentent des opportunités pour l'interpolation et l'extrapolation des données à partir de variables d'intérêt, permettant ainsi de mieux comprendre les phénomènes à l'échelle globale.

## Gérer la complexité (hétérogénéité, non-linéarité) des SIC dans les modèles

Au delà des spécificités et enjeux décrits, les forces et opportunités des modèles intégrant de vastes échelles d'espace et de temps diffèrent peu des modèles plus ciblés et sont donc reprises dans le chapitre « Données en SIC » p. 104. Sont détaillés ici les points relatifs à la production de modélisations quantitatives et holistiques robustes et à leur transfert et appropriation par les acteurs socio-économiques.

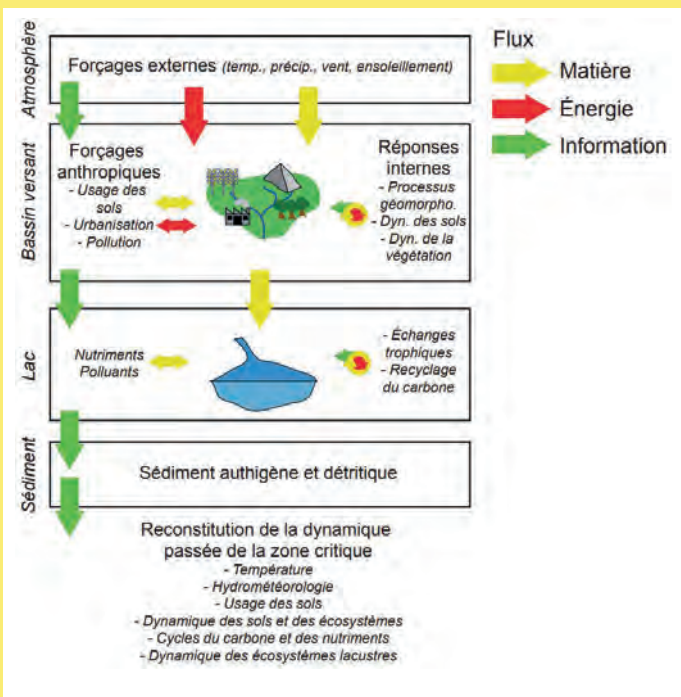
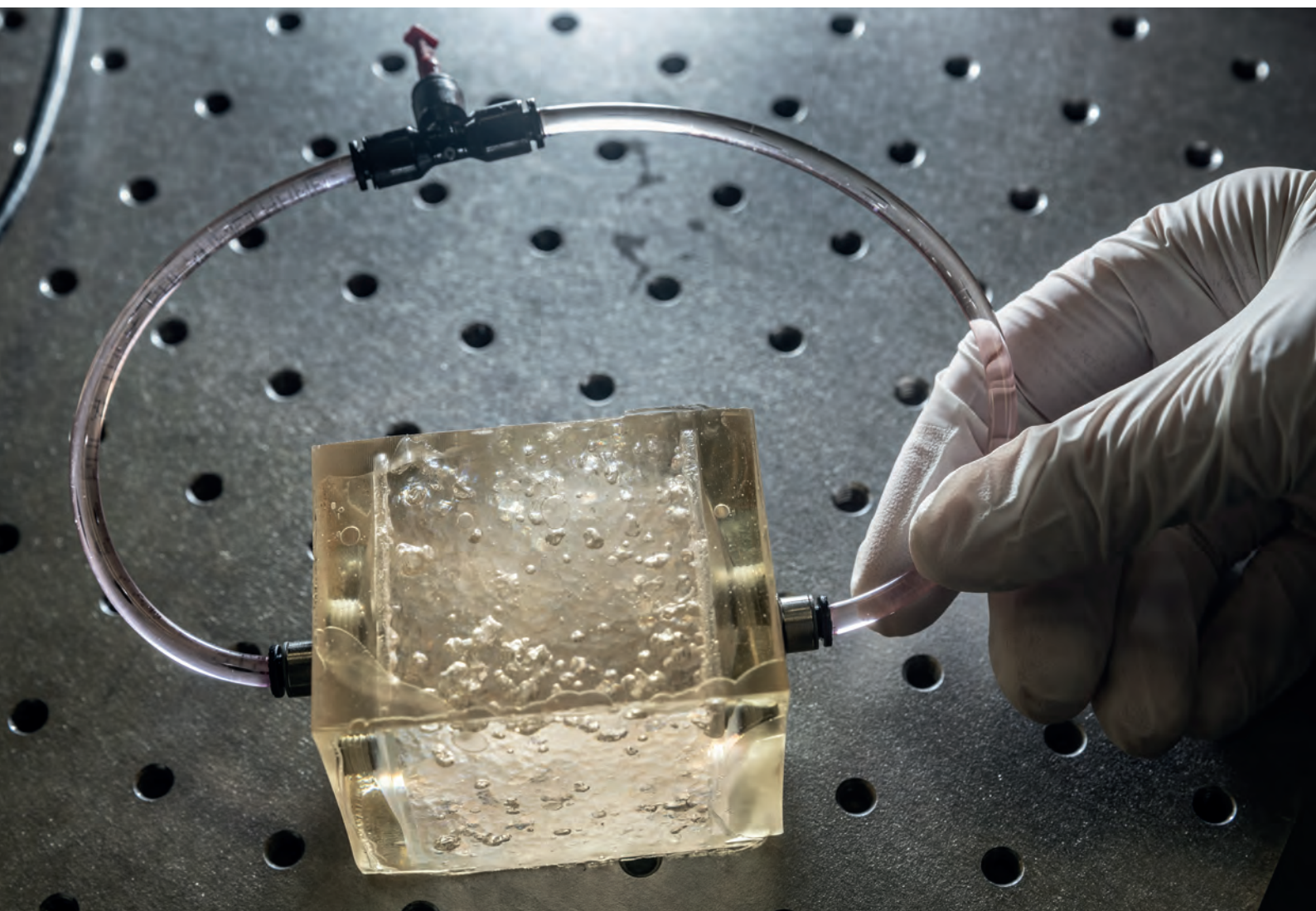


Figure 1. Schéma des flux de matière, d'énergie et d'information depuis les bassins versants aux lacs, sous-tendant la notion de « rétro-observatoire » de la Zone Critique. Modifié d'après Arnaud & Sabatier (2021).



Modèle d'une roche naturelle imprimé en 3D. La roche a été tomographiée aux rayons X puis imprimée dans une résine transparente. Le modèle 3D a alors une structure de porosité qui est la même que celle de la roche, avec une transparence qui pourra permettre de simuler et d'imager les processus de transport qui ont lieu à l'intérieur. Une fois installé sur une table optique, des lasers seront injectés dans ce modèle et permettront de visualiser les écoulements. L'objectif est de comprendre tout ce qui est transporté, par exemple l'eau qui s'écoule dans les sols, dans laquelle il y a de nombreux composés chimiques, des nutriments, des particules, des nanoplastiques etc. Ce modèle est un des objets utilisés dans l'ERC Chorus.

© Jean-Claude MOSCHETTI / Géosciences Rennes / CNRS Images

### Des modélisations holistiques et robustes

- La généralisation des analyses de sensibilité à un large éventail de modèles permettrait de mieux **identifier les paramètres critiques qui influencent significativement les résultats des simulations intégrant des échelles étendues d'espace et de temps**. Cela contribuerait à rendre les modèles plus robustes et à améliorer la compréhension des incertitudes associées aux prévisions. En utilisant des analyses de sensibilité généralisées, il devient possible de cibler les paramètres qui nécessitent une attention particulière, réduisant ainsi les incertitudes.

- Le deep learning couplé à des approches statistiques offre également des opportunités pour mieux quantifier les incertitudes liées au calage et à l'intégration des modèles, améliorant leur fiabilité. L'évaluation et la **réduction des incertitudes dans les modèles et à leurs interfaces** est essentielle pour garantir la robustesse des prédictions. L'approche de la **data worth analysis** permet d'estimer la valeur ajoutée de chaque nouvelle donnée collectée pour l'amélioration des prévisions, optimisant ainsi les efforts d'acquisition de données pour maximiser leur impact sur la précision des

modèles, aussi bien au niveau des paramètres que des prédictions.

- Le concept de **jumeau numérique**, qui peut se décliner à toutes les échelles et dans lequel un modèle est continuellement ajusté en fonction de nouvelles observations, propose une approche innovante pour garder les modèles à jour et pertinents. Organiser des retours d'expérience entre théorie, modélisation, expérimentation et observation est essentiel pour définir les besoins, améliorer continuellement la qualité des modèles et des données qui les alimentent, et ainsi mieux appréhender les dynamiques environnementales complexes.
- L'amélioration de la **communication entre modèles et leur couplage dans un continuum d'échelles spatiales et temporelles** est un autre point clé. Notamment, faciliter les échanges d'entrées/sorties (I/O) permettrait de créer des chaînes de modélisation plus cohérentes et efficaces. Par ailleurs, l'exploitation des **big data** pour caractériser les échelles temporelles est essentielle pour étudier les héritages écologiques et la résilience des systèmes face aux pressions climatiques et anthropiques. Ces données permettent de suivre l'évolution des écosystèmes sur des périodes prolongées et d'identifier des points de bascule potentiels. En analysant ces données, il devient possible de prévoir

des changements soudains et d'adapter les stratégies de gestion en conséquence.

### Renforcer l'interdisciplinarité pour une meilleure appropriation des modèles par les acteurs socio-économiques

- L'interdisciplinarité entre l'INSU, CNRS Écologie & Environnement et CNRS Sciences Humaines & Sociales est en plein développement et elle est cruciale pour l'étude des SIC, notamment pour les thématiques des échelles spatiales et temporelles. Par exemple, la modélisation de la mobilité des organismes, y compris des humains, permet de mieux simuler les réponses du Système Terre aux perturbations contemporaines. Le maintien et le renforcement de cette interdisciplinarité devra s'appuyer sur la **mise en commun** par les parties prenantes **des données et modèles** produits, en apportant un soin particulier à leur **interopérabilité et interfaçage**.
- Les aspects liés au **transfert des modèles produits vers les acteurs socio-économiques** (e.g. gestionnaires, opérateurs, etc.) pour qu'ils s'approprient ces prédictions dans une démarche opérationnelle coconstruite ne diffèrent pas des autres contextes et sont donc repris dans le chapitre ad hoc (cf. chapitre « continuum sciences-société et transdisciplinarité » p. 116).

Confluence entre les rivières Yalong (premier plan, eaux bleues) et Anning (au fond, eaux marron) en septembre 2017 (Chine). La rivière Yalong charrie peu de sédiments à cause de la présence de barrages dans la zone amont proche ; tandis que la rivière Anning, bien que plus petite, fournit une grande quantité de sédiments au système à cause de la présence de fortes pentes et de zones agricoles immédiatement en amont de la confluence.  
© Julien BOUCHEZ / IPGP



# Recommandations

## Développements instrumentaux, expérimentaux et numériques

- La communauté devrait s'appuyer plus fortement sur l'IR RéGEF afin de favoriser les **développements technologiques et instrumentaux** transverses pour les méthodes de datation (e.g. (U-Th)/He, déséquilibre U/Th, OSL,  $^{14}\text{C}$  in situ,  $^3\text{He}$  extraterrestre, analyse isotopique  $^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , etc.) qui sont actuellement distribuées au sein de plusieurs de ses réseaux (e.g. Spectrométries gaz rares, AMS, TIMS, MC-ICPMS & LA-ICPMS, etc.).

- Pour mieux intégrer les réponses des écosystèmes au changement climatique, notamment les réponses non linéaires et les impacts des événements extrêmes, il est essentiel de poursuivre l'**intégration des observations à haute résolution et à large couverture spatiale avec des modèles basés sur des principes physiques**. Cela permettrait de mieux comprendre des dynamiques complexes à travers différentes échelles d'espace et de temps.

- Pour étudier les points de bascule des écosystèmes en **écologie** il est important d'aller au-delà de la simple dynamique des populations et des communautés et d'**analyser la dynamique globale des écosystèmes**.

- Il est nécessaire de renforcer les approches **expérimentales et numériques permettant de favoriser le transfert de données entre les échelles moléculaire, du pore et du continuum**. Sur le plan numérique, il sera essentiel d'allonger les temps de simulation, notamment en modélisation moléculaire, tout en maintenant un haut niveau de précision théorique. Cela pourra être réalisé grâce à des méthodes telles que la dynamique moléculaire accélérée et les approches semi-empiriques, permettant de capturer des processus complexes à différentes échelles de temps et d'espace. De la même manière, le **développement des modèles de transport réactif**, incluant des contraintes cinétiques pour les réactions organiques, inorganiques et les interactions minéral-organique, est un outil essentiel pour **mieux capturer la complexité des interactions dans les systèmes environnementaux et hydrologiques** (cf. chapitre « Données en SIC » p. 104).

- Il est urgent de **faire bénéficier la communauté SIC des développements en Big Data et de l'IA** pour mieux contribuer au traitement de données issues de différentes échelles spatiales et temporelles (cf. chapitre « Données en SIC » p. 104). Dans cette perspective, il apparaît important d'encourager l'effort de formation des étudiants et des personnels à ces méthodes. L'organisation de workshops ou d'écoles permettrait de préciser les questions scientifiques et méthodologiques auxquelles ces technologies peuvent répondre (cf. chapitre « Formation — Métiers — Compétences » p. 134).

## Rapprocher les communautés disciplinaires pour combiner les échelles

- Promouvoir le **temps dédié à l'intégration d'échelles** (dont la productivité n'est pas visible à court terme) en adaptant les critères d'évaluation encore très axés sur la performance disciplinaire et donc sur une échelle d'espace et de temps déterminée. Dans ce but, il est recommandé de **soutenir la mobilité géographique et thématique** des personnels afin de favoriser l'échange d'expertise au travers de budgets alloués.

- Il est nécessaire d'**encourager le rapprochement des communautés SIC** actuelle et paléo, des communautés disciplinaires distinctes (e.g. CoNRS 18, 30, 31, 39) et interdisciplinaires (CID52, 55), ou de la communauté SIC et celle des Historiens dans le but de répondre à des questions transverses autour de l'intégration des échelles de temps. De la même manière, il apparaît souhaitable de renforcer le dialogue entre modélisateurs « SIC » et ceux d'autres disciplines (e.g. physique, chimie, biologie, économie, démographie, etc.) et de **favoriser les retours d'expérience entre communautés spécialisées dans les expériences, les observations et la modélisation**. Dans cette optique, développer les espaces et les temps d'échanges entre communautés sous forme de workshops serait à soutenir.

- La création d'un **RT dédié au changement d'échelle** (des processus élémentaires à l'échantillon), qui incorporerait les compartiments abiotiques et biotiques, permettrait de travailler efficacement au développement d'un continuum d'outils et de modèles intégratifs au service de la recherche en SIC.

- Enfin, la **création d'AAP incitatifs et adoptant une définition élargie de l'interdisciplinarité** permettrait également d'encourager les approches multi-échelles (e.g. croisement de mesures nano et micro ou de données de télédétection avec des mesures de terrain locales dans le cadre des SNO, ZA, OHM).

- La **collaboration entre les réseaux d'observatoires** (e.g. IR OZCAR et RZA, OHM, etc.) permet également d'intégrer les enregistrements géographiques, sociologiques, économiques et biogéochimiques des dernières décennies à plusieurs siècles et doit donc être encouragée (cf. chapitre « Observons les observatoires ») p. 98.

- Ces modèles intégrant différentes échelles d'espace et de temps présentent un **intérêt évident pour les acteurs du monde socio-économique** (e.g. gestionnaires, collectivités, opérationnels, industriels, etc.). Les recommandations pour leur renforcement et leur développement ne diffèrent toutefois pas des autres contextes et sont donc reprises dans le chapitre ad hoc (cf. chapitre « Continuum Sciences-Société et Transdisciplinarité » p. 116).

## Sites et données

- La connectivité entre les différentes régions du monde est un élément clé pour appréhender les dynamiques globales du climat et de l'environnement. Certaines régions, telles que **la cryosphère, les hautes latitudes et les zones intertropicales** sont encore insuffisamment étudiées. Pour combler ces lacunes, **il est crucial d'intégrer davantage de données provenant de ces régions dans les modèles climatiques et environnementaux**. Ceci peut se faire au travers de campagnes d'observation ciblées, de partenariats internationaux pour le partage de données, et de l'amélioration des modèles de connectivité prenant en compte les flux entre ces régions et le reste du monde.
- Le **développement de réseaux d'observations coordonnées** permettrait de créer des bases de données spatialisées, facilitant l'interpolation et l'extrapolation des données à partir de variables d'intérêt. Ces **réseaux contribueraient à une meilleure compréhension des processus environnementaux globaux** en s'appuyant sur un maillage d'observations à grande échelle. Cela renforcerait également la capacité à prédire les réponses des systèmes terrestres face aux perturbations climatiques et anthropiques.
- Il apparaît nécessaire de **mieux intégrer les rétro-observations dans les sites d'observation** existants des IR OZCAR et RZA (eLTER France) pour favoriser la communication entre les communautés paléoenvironnementales et les scientifiques travaillant sur la période actuelle, afin de déterminer des indicateurs paléo quantitatifs qui puissent être comparés aux données actuelles et être intégrés aux modèles.
- Les recommandations relatives à la **simplification du paysage afin de fluidifier les échanges de données entre organismes** (e.g. CNRS, IRD, CIRAD, INRAe, Ifremer, BRGM, CEA, Météo-France, etc.) et de leur **interopérabilité aux niveaux Français et Européen** (e.g. Data Terra, THEIA, Gaia Data, eLTER, etc.) pour l'étude des échelles de temps et d'espace ne diffèrent pas des autres contextes et sont donc reprises dans le chapitre ad hoc (cf. chapitre « Observons les observatoires » p. 98).
- Hormis pour ce qui concerne la nécessaire **intégration des données paléo dans les bases de données « actuelles »**, les recommandations pour le nécessaire renforcement de leur mise à disposition ne diffèrent pas des autres contextes et sont donc reprises dans le chapitre ad hoc (cf. chapitre « Données en SIC » p. 104).
- Enfin, la nécessaire prise en compte de l'empreinte environnementale des recherches en SIC doit inciter la communauté SIC à **s'interroger sur la nécessité de produire de nouvelles données** sur le long terme et sur l'impact de leur stockage. Dans cette même logique, la réutilisation des données et échantillons existants devrait être encouragée dans les AAP (cf. chapitre « Responsabilité environnementale de la recherche en SIC » p. 124).

## Références

- Arnaud F. & Sabatier P., 2021. *Lakes as Recorders of Earth Surface Dynamics From Yearly to Plurimillennial Time-Scales (Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier, 2021)*. <https://hal.science/hal-03478550>
- INSU, 2024. *Livre Blanc paléoclimats et paléoenvironnements*, <https://www.calameo.com/read/0064605873cfcaba812c7>

# Stocks et ressources naturelles (eau, carbone et métaux critiques): durabilité dans un contexte de changement global et de limites planétaires



# Les enjeux

La notion de « ressources » désigne, par définition, un moyen matériel (un flux) de subsistance ou bien un capital (un stock) à exploiter ou à extraire (notion d'extractivisme ; Boude & Chaboud, 1993). Une ressource est généralement associée au besoin d'une société pour vivre et/ou se développer. En particulier, dans le cas des ressources naturelles, un élément de l'environnement ne devient une ressource que lorsqu'il existe une demande et une technologie pour l'exploiter (Rotillon, 2005, 2022). La notion de ressource est largement débattue de longue date au sein de la communauté des économistes, qui distinguent les ressources renouvelables des ressources non renouvelables. L'économiste Ricardo (1772-1823) soulignait déjà la contradiction selon laquelle la rareté ou l'épuisement d'une ressource non renouvelable est relative, car sa disponibilité sur le marché dépend de l'acceptation de son prix par les consommateurs. Ainsi, à mesure qu'une ressource se raréfie, son prix augmente, sa demande diminue, et les consommateurs, et donc les sociétés, cessent de la considérer comme une ressource. Également contradictoire, la dénomination « ressource renouvelable » n'empêche pas nos sociétés d'épuiser ces ressources, que ce soit à l'échelle globale avec le dépassement des limites planétaires (Rockström *et al.*, 2009) ou à des échelles plus locales, avec l'épuisement de certains aquifères, par exemple. Cette négation des limites physiques par certaines théories économiques interroge les économistes depuis plusieurs siècles. Au XVIII<sup>e</sup> siècle, l'école des physiocrates par exemple, avait déjà conscience des limites biophysiques à la production économique (Hamaide *et al.*, 2012). Les écoles économiques qui ont suivi ont eu tendance à nier ces limites. Le club de Rome a réintroduit cette question des limites avec le célèbre rapport Meadows « The limits to growth » (Meadows *et al.*, 1972). Les résultats et les implications de ces simulations continuent de susciter des débats, bien que peu d'autres modèles et de données contredisent les trajectoires simulées.

Ces simulations montrent que, sans changement dans l'industrialisation, la production agricole, la pollution et l'utilisation des ressources naturelles, la limite de la croissance serait atteinte au XXI<sup>e</sup> siècle, entraînant un effondrement de l'économie mondiale, en particulier en raison de l'épuisement des ressources naturelles, ce qui se traduirait — entre autres — par une baisse drastique de la population mondiale.

Ces travaux ont également mobilisé la communauté des sciences de l'environnement, qui depuis les années 70, s'intéresse à des questions de recherche concernant la quantification des stocks, des flux, leur renouvelabilité, et leur qualité. En 1993, Jollivet et Pavé ont formalisé un cadre pour les sciences de l'environnement, dans lequel l'étude de la gestion des ressources naturelles (y compris la biodiversité) constituait l'un des trois ensembles de questions scientifiques à traiter, au côté des grands équilibres planétaires et de l'impact des sociétés et de leur mode de vie sur elle-même et leur environnement (Jollivet & Pavé, 1993). Ils ont également proposé une feuille de route incluant la problématisation, la hiérarchisation fonctionnelle et à différentes échelles, l'interdisciplinarité inhérente aux questions relatives à la gestion des ressources naturelles, la modélisation, et enfin, les politiques publiques et les innovations techniques à mettre en place pour préserver l'environnement. Ces thèmes de recherche restent d'actualité, mais les résultats de la recherche peinent à se diffuser vers la société, qui attend des réponses pour mieux gérer ces ressources. Malgré cette mobilisation, la notion de ressource était presque absente de la dernière prospective SIC. Ainsi, il nous semble nécessaire de consacrer une section spécifique dédiée aux ressources et stocks naturels et à leur soutenabilité, afin de mieux répondre aux demandes sociétales et de renforcer les démarches interdisciplinaires indispensables pour atteindre cet objectif.

## Les questions scientifiques

Cette section identifie les grandes questions scientifiques relatives aux ressources naturelles, et plus généralement aux grands stocks de matière (eau, sol, vivant, énergie et matières premières) dans les environnements géologiques de surface, ainsi que leur durabilité. Les activités humaines exercent, non seulement des pressions croissantes sur les ressources naturelles, de manière directe, par leur utilisation, extraction ou sur-exploitation, et leur pollution, mais aussi de manière indirecte, en perturbant les écosystèmes de la Zone Critique, en partie en raison du changement climatique. Ces pressions anthropiques menacent aujourd'hui la stabilité du

système Terre, incluant la géosphère, la biosphère et l'atmosphère, toutes contenant les ressources exploitées actuellement. Le concept de limites planétaires définit un espace de développement sûr pour l'humanité, basé sur neuf processus biophysiques. Ensemble, ces processus régulent la stabilité de cette Zone Critique et chacun d'eux est susceptible de provoquer des basculements, passant d'un « stable et sûr pour l'humanité » à un état instable, générant davantage d'aléas. Plusieurs de ces processus sont aujourd'hui dépassés (indiquant des activités non durables) ou sont sur le point de l'être. Ils concernent notamment la disponibilité en eau douce, la

biodiversité, l'usage des sols, les cycles biogéochimiques (en particulier de l'azote et du phosphore), et les polluants émergents. La suite de cette section détaille les grandes questions scientifiques concernant les ressources naturelles que sont les ressources en eau douce, biologiques, énergétiques et minérales, ainsi que les stocks de carbone.

La majorité des questions scientifiques relatives aux ressources naturelles nécessite une approche interdisciplinaire. Elles sont ici présentées en deux parties: i) par grand type de ressources et ii) de manière transversale entre ressources.

## Questions par grand type de ressources

Cinq grandes catégories de ressources, sur lesquelles émergent des questions de recherche spécifiques, ont été identifiées: i) Ressources en eau, ii) Ressources trophiques, biologiques, nutritives & stocks biologiques, iii) Stocks de carbone, iv) Ressources énergétiques (Basse Température), v) Ressources minérales. À noter que les sols en tant que ressources n'apparaissent pas spécifiquement.

### Ressources en eau

Les ressources en eaux douces sont d'une **importance vitale pour la sécurité alimentaire et le maintien des écosystèmes** dans de nombreuses régions du monde. La variabilité climatique et les pressions induites par les activités humaines affectent de différentes façons les quantités et qualités des ressources en eau, qu'elles soient de surface comme souterraines, à différentes échelles de temps (de l'intra-annuelle jusqu'à plusieurs milliers d'années).

**La gestion durable de ces ressources nécessite de développer des connaissances sur les différentes composantes du cycle de l'eau à l'échelle des bassins versants et des aquifères et leurs relations.** Ceci passe i) par de nouvelles approches ou applications méthodologiques dans différents domaines (géochimie, sciences du numérique dont l'intelligence artificielle, technologies d'instrumentation, géophysique, etc.) et leurs croisements (approches multi-méthodes), et ii) par des investigations à intensifier dans des milieux particulièrement vulnérables (milieu urbain, milieux côtiers autour des questions de la salinisation des eaux souterraines, etc.). **Le besoin de connaissance sur les ressources en eau en milieu urbain est renforcé** par l'intérêt croissant pour le verdissement des villes comme solution d'adaptation au changement climatique, et notamment pour lutter contre les îlots de chaleur, demandant des ressources en eau et impactant le cycle de l'eau urbain. Dans ce contexte, mieux comprendre le fonctionnement des aquifères et de la recharge dans un milieu hautement artificialisé comme la ville, présente des enjeux et des défis spécifiques. Au-delà des aspects quantitatifs, la question de la qualité de l'eau est également particulièrement importante dans le contexte



Parement aval du barrage du Monteynard sur la rivière le Drac en Isère, France. Il s'agit d'un barrage de type voûte épaisse en béton, d'une hauteur de 153 mètres et le volume de la retenue est de 275 millions de m<sup>3</sup>.  
© Philippe BOIS/CNRS Images

urbain. Au-delà de la ville, la réduction des incertitudes dans la quantification de la recharge des aquifères reste une question cruciale pour la communauté, quel que soit le milieu.

**Comprendre et anticiper les impacts humains sur les ressources en eau**, qu'ils soient directs, par exemple, au travers des prélèvements, le stockage artificiel, les retenues, les changements d'utilisation sols, ou indirects, par le biais des changements climatiques causés par l'augmentation des concentrations de GES d'origine anthropique, constituent des enjeux majeurs. Ces deux types d'effets anthropiques sont souvent interconnectés (e.g. les prélèvements évolueront en fonction des impacts du changement climatique sur la ressource), voire potentiellement couplés, nécessitant des approches interdisciplinaires associant sciences physiques, biologiques et sciences humaines.

**Améliorer la représentation du cycle hydrologique des régions anthropisées dans les modèles hydrologiques** implique de représenter la prise de décision humaine dans le processus de gestion, de formaliser les facteurs

socio-économiques et politiques qui la régissent, et de bien comprendre comment les politiques publiques se traduisent sur le terrain. Par ailleurs, au-delà des études d'impact et de la caractérisation des trajectoires possibles d'évolution de ces ressources sous l'effet des changements climatiques et des mutations sociales, les recherches sur les ressources en eau doivent aussi **proposer des pratiques et des modes de gestion alternatifs plus durables**, acceptables par les populations. Cela suppose une approche systémique couplant sciences biogéophysiques et sciences humaines et sociales. Ces grands enjeux et cette approche systémique sont pris en compte dans le PEPR OneWater.

## Ressources trophiques, biologiques et nutritives & stocks biologiques

Les cycles biogéochimiques de l'azote (N) et du phosphore (P) sont significativement perturbés par les activités humaines, notamment à travers l'épandage d'engrais agricoles issus de l'azote de synthèse et de phosphore minier, ainsi que par l'élevage, qui entraîne des concentrations élevées de N et P dans les sols et eaux en raison des déjections animales, et des rejets d'eaux usées sanitaires ou industrielles.

Ces concentrations excessives provoquent l'eutrophisation des eaux de surface et des eaux côtières, ce qui conduit à une érosion de la biodiversité aquatique et à la formation de « zones mortes ».

Cette perturbation est un phénomène global aux impacts à la fois localisés (sur la qualité des eaux) et globaux (émissions de N<sub>2</sub>O, un gaz à effet de serre). Concernant les sources de pollution en N et P d'origine agricole, il est nécessaire d'améliorer l'évaluation des flux et des temps caractéristiques de transfert entre le champ et les écosystèmes « récepteurs » (aquifères, lacs et rivières, eaux côtières), ainsi que de la sensibilité des espèces et des communautés aquatiques locales, pour identifier les zones et activités les plus dommageables pour la biodiversité.

En plus de l'eutrophisation, la pollution des eaux par un excès de N et P peut dégrader la qualité de l'eau, la rendant impropre à certains usages, comme la consommation humaine. Une proportion importante de la population obtient son eau potable à partir de sources non traitées.

**Plusieurs enjeux concernent également l'altération de la ressource biologique** (biodiversité aquatique) par la pression anthropique et le changement climatique (surtout en milieux côtiers et estuariens) et **l'usage de la biomasse et ses transformations**.

## Stocks de carbone (C)

Les écosystèmes continentaux renferment de nombreux réservoirs de carbone (e.g. sols, biomasse, écosystèmes aquatiques lenticques et lotiques, zones humides, etc.) dont la sensibilité au changement global est variable mais bien réelle. Les accords de Paris incitent à réduire les émissions de C dans l'atmosphère en utilisant différents leviers, comme l'amélioration de l'efficacité de

la séquestration du C. Par exemple, l'initiative « 4 pour 1000 » est un exemple médiatisé des enjeux liés au stockage de C dans les sols.

Il est essentiel, dans un premier temps, **d'identifier les phases porteuses du C, de les caractériser (notamment organique), de quantifier les stocks et de modéliser leur évolution** pour les prochaines décennies en fonction du changement climatique et des impacts anthropiques. Pour les écosystèmes aquatiques lenticques et lotiques, nous renvoyons au chapitre traitant des « Interfaces et Continuum dans les SIC ».

Le **stockage du carbone dans les sols et les végétaux** contribue à la fois à l'atténuation du changement climatique et à l'adaptation des territoires. Les sols et les végétaux captent les gaz à effet de serre dans l'atmosphère et les stockent, formant ainsi des puits de carbone. Les stocks de C dans les écosystèmes continentaux font l'objet du **programme PEPR FairCarboN**, qui vise à améliorer la compréhension du cycle du C et à évaluer la contribution possible et souhaitable des écosystèmes continentaux à l'objectif de neutralité carbone. Cependant, les projets actuels ne portent que sur une évaluation et une prédiction partielle de l'évolution des stocks de C face au changement global (e.g. usage des sols, réponse des communautés microbiennes, épisodes de sécheresse, etc.). Au-delà de la pérennisation du financement de ces projets nationaux, les actions à mener devront s'inscrire dans une démarche holistique fortement interdisciplinaire (e.g. pédologie, biologie, géochimie globale, moléculaire et isotopique, géophysique de surface, etc.) en incluant des sciences sociales (politiques et économiques), en particulier sur la prédiction des usages des SIC pilotées par les grandes orientations politiques et sociales, et devront reposer sur l'ensemble des observatoires ou sites ateliers. Pour tous ces puits de carbone, nos efforts doivent se concentrer sur la caractérisation de: i) son origine, ii) sa quantité et de sa dynamique (développement de méthodes standardisées, raffinement des flux sortants et entrants par l'accroissement de la fréquence de mesures ou par le développement de méthodes low-cost et non destructives facilitant la haute résolution), et iii) des facteurs qui gouvernent sa dynamique, y compris sa durée de stockage. Ceci permettra d'établir un diagnostic sur la sensibilité de ces réservoirs de C continentaux face au changement global, en particulier pour les milieux clés comme les zones humides, les interfaces Terre-Mer ou les environnements de haute latitude (i.e. pergélisol). En intégrant observations, expérimentations (mésocosmes) et de la modélisation assistée par l'AI, couplant climat, SHS, et ceux propres aux réservoirs étudiés, **la communauté SIC pourra alors caractériser ces puits de C, améliorer leur efficacité et prédire leur capacité de stockage pour les prochaines décennies**. Toutefois, il est important de rappeler que le développement de pratiques de gestion des écosystèmes favorisant une meilleure séquestration du carbone doit être accompagné d'une évaluation approfondie, prenant en compte non seulement le bilan carbone de la pratique mais aussi, l'effet complet sur le bilan radiatif, en considérant les autres flux de gaz à effet

de serre ainsi que l'impact sur les variables biophysiques influençant le climat (e.g. albédo, évapotranspiration, etc.).

De même, il convient de noter qu'une partie de la séquestration du carbone nécessaire au respect de l'accord de Paris passe par un stockage sous forme inorganique. Ce stockage peut s'opérer sous deux formes principales. La première consiste en une **altération forcée** de certaines roches, qui seraient épandues sur les surfaces (*enhanced weathering*). L'altération de ces roches fixant le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, principalement sous la forme de carbonates, qui peuvent soit rester sur place, soit être transportés dans les rivières puis dans les océans. Ces approches supposent une séparation entre le cycle organique et inorganique du C à la surface de la Terre, mais des études récentes suggèrent que cette séparation n'est pas aussi nette. Il est donc crucial de mieux **comprendre les interactions entre les cycles organiques et inorganiques**, d'autant plus que cette pratique devient très utilisée sur le marché carbone et pourrait avoir des conséquences majeures sur les écosystèmes et leurs fonctionnements. La seconde pratique de séquestration du C n'utilisant que la partie inorganique du cycle du C est le **captage et le stockage dans le sous-sol**. Bien que cette pratique puisse sembler attrayante, car elle est *a priori* moins impactante pour l'environnement (le but étant de remplir la porosité obtenue suite à l'exploitation d'énergies fossiles par du CO<sub>2</sub>), son déploiement à l'échelle industrielle souffre encore de nombreuses incertitudes. Ces incertitudes pourraient être levées en partie par des approches de recherche fondamentales. Une bonne connaissance de la géologie du terrain concerné et des interactions entre les roches sur place et le CO<sub>2</sub> injecté nécessite le développement d'outils d'analyses auxquels le CNRS peut activement participer.

## Ressources énergétiques (Basse Température)

Le dihydrogène (H<sub>2</sub>) est une molécule clé des futurs systèmes énergétiques et considéré comme un vecteur d'énergie prometteur pour remplacer les combustibles fossiles. Actuellement la majorité de l'hydrogène produit est dérivé de combustibles fossiles (hydrogène gris) ou est obtenu par la combinaison de cette production avec la capture et le stockage du CO<sub>2</sub> (hydrogène bleu). Dans le cadre de la transition énergétique et le développement d'énergies décarbonées, une perspective attractive se présente avec l'exploitation d'une source naturelle d'énergie verte : les immenses réservoirs potentiels d'H<sub>2</sub> naturel, également appelé H<sub>2</sub> blanc, H<sub>2</sub> géologique ou H<sub>2</sub> d'or.

Les recherches menées par plusieurs groupes de géologues ont permis d'identifier des émanations permanentes d'hydrogène libre à la surface de la Terre dans de nombreuses régions du monde. L'exploitation de cette ressource nécessite une meilleure compréhension des processus et de leur dynamique gouvernant **l'origine de ces productions d'H<sub>2</sub>, leur intensité, leur accumulation souterraine, ainsi que l'influence du**

**microbiome souterrain et de surface sur la production et la consommation de l'hydrogène blanc.**

**Augmenter la production artificielle d'hydrogène** à partir de sources renouvelables (solaire, éolien, hydroélectricité), l'hydrogène vert en tant que vecteur énergétique, **et sécuriser son stockage souterrain** dans des structures géologiques constituent également des enjeux majeurs. Cependant, la production d'hydrogène par électrolyse est énergivore et nécessite une quantité significative d'eau, ce qui peut poser des problèmes dans les régions où l'eau est rare.

**Les biotechnologies mettant en œuvre des interfaces solide-liquide-microorganismes** offrent également des perspectives prometteuses pour la production d'énergie durable et renouvelable, notamment dans la production de biocarburants, la bio-électrochimie, et le traitement des déchets organiques. Par exemple, les piles à combustible microbiennes (MFC) exploitent l'activité métabolique des microorganismes pour **convertir l'énergie chimique des substrats organiques en énergie électrique**. La production biologique d'hydrogène est également en développement, notamment *via* des procédés photobiologiques ou de fermentation obscure, selon les microorganismes impliqués.

Les questions scientifiques se situent à plusieurs niveaux :

- **Origine et processus de formation de l'H<sub>2</sub> blanc (à l'interface TS-SIC) :** il est crucial de déterminer l'origine, le contexte géologique, et les processus hydro-physico-chimiques responsables de l'accumulation et de la production d'H<sub>2</sub> blanc. Ceci inclut la compréhension des processus géologiques et hydro-physicochimiques à l'origine de l'H<sub>2</sub> natif, les processus géologiques et structuraux de migration de l'H<sub>2</sub> depuis la source jusqu'à la surface au sein des bassins sédimentaires, ainsi que le développement des capteurs pour mesurer les flux d'hydrogène en phase gazeuse ou aqueuse, essentiels pour le suivi géochimique de H<sub>2</sub> natif ou stocké. Il est aussi nécessaire d'évaluer l'impact environnemental liée à la production et à l'exploitation des gisements.
- **Exploration et de prospection des gisements d'H<sub>2</sub> :** Le développement de méthodes d'exploration et de prospection des gisements d'H<sub>2</sub>, ainsi que l'évaluation des quantités disponibles, sont indispensables. La dynamique des processus dans les stockages souterrains de H<sub>2</sub> lors de l'injection et du soutirage du gaz, ainsi que ses interactions avec l'eau de formation et d'autres gaz (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, He, etc.), nécessitent des études approfondies, en particulier sur la thermodynamique des mélanges multi-composants. L'exploitation des gisements d'hydrogène natif présente plusieurs impacts environnementaux potentiels qui doivent être évalués en détail. *À l'échelle locale :* perturbation des sols et des habitats naturels du fait des activités de forage et d'extraction ; fragmentation des habitats ; pollution des eaux souterraines (risque de contamination des aquifères par des produits chimiques utilisés dans le processus d'extraction) ; risque de sismicité induite. *À l'échelle globale :* les fuites d'hydrogène, bien que non directement liées à l'effet de serre, peuvent avoir



Station de ravitaillement en hydrogène à Nantes. Cette station est ouverte aux particuliers utilisant des voitures à hydrogène mais également aux utilitaires et aux bus. L'avantage de l'hydrogène par rapport aux véhicules électriques à batterie réside d'une part dans l'augmentation drastique de l'autonomie: un véhicule familial peut parcourir environ 100 km avec 1 seul kilogramme d'hydrogène. Et d'autre part dans la réduction tout aussi importante des temps de recharge puisqu'il est possible de faire le plein en quelques minutes seulement.

© Jean-Claude MOSCHETTI / IMN / CNRS Images

des effets indirects sur l'atmosphère, en modifiant les niveaux de méthane et d'ozone.

- **H<sub>2</sub> - interaction avec les microorganismes.**

Actuellement, les connaissances sur les microorganismes qui consomment ou produisent de l'H<sub>2</sub> sont encore très limitées. Pour établir des bilans globaux intégrant les mécanismes abiotiques et biotiques de production et de consommation d'H<sub>2</sub>, il est impératif de mener des recherches spécifiques et multidisciplinaires impliquant géologues, géochimistes et microbiologistes sur des sites naturels producteurs d'hydrogène. Ces recherches pourront permettre la mise en évidence de microorganismes bio-indicateurs de réservoirs d'hydrogène. Par ailleurs, d'autres biotechnologie de production d'hydrogène à partir de différents composés dont le méthane émergent. Différentes avancées dans ce domaine ont permis de développer de nouvelles technologies dont les procédés de méthanisation souterraine qui consiste à injecter un mélange de H<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub> dans des réservoirs souterrains pour les transformer en CH<sub>4</sub> par le microbiome indigène. Cette technologie est également liée aux problématiques de stockage du CO<sub>2</sub>.

- **H<sub>2</sub> - modélisation mathématique.** Ce domaine, à la croisée de la géochimie, de la microbiologie, de la cinétique chimique, de la mécanique des fluides et de la thermodynamique hors d'équilibre, engendre le développement de nouveaux modèles mathématiques conceptuels pour les processus d'auto-organisation dans les écoulements multi-phasiques avec bio-réactions. Il inclut le développement de la théorie qualitative de ces modèles, l'étude de la stabilité des solutions, l'analyse asymptotique du comportement à long terme.

## Ressources minérales

La demande mondiale en ressources minérales et métalliques a doublé depuis les années 1990, en grande partie en raison du développement technologique et des infrastructures. Cette intensification est particulièrement marquée ces dernières années, notamment pour produire les métaux de la transition qui entrent par exemple dans la fabrication des outils numériques, des voitures électriques, et des éoliennes (Li, Co, Terres rares, etc.).

De nombreux projets d'exploitation émergent à travers le monde, y compris en France (e.g. projet d'extraction de Li dans l'Allier). Ces dynamiques s'inscrivent dans des processus économiques mondiaux, et l'extraction des ressources minières primaires comporte de nombreux risques écologiques, économiques et sociaux. Les risques associés incluent des impacts locaux (dégradation des écosystèmes, diminution de la biodiversité, pollution des aquifères, précarisation socio-économique, dégradation de la santé des populations, inégalités, etc.) et globaux (gaz à effet de serre).

**La diversité et la variabilité des défis que doivent relever les projets miniers tout au long de leur mise en œuvre rendent nécessaire de considérer les activités minières sur l'ensemble de leur cycle de vie et au-delà, dans l'accompagnement post-minier des territoires.** Les solutions doivent tenir compte à la fois des contextes géologiques (nature des gisements et des processus d'exploitation et traitement), mais aussi de ceux environnementaux, sociaux, économiques et politiques. Contribuer à atteindre l'objectif global d'accompagner l'activité minière dans une perspective de responsabilité croissante, de réduire leurs impacts négatifs, de restaurer les environnements et territoires dégradés, demande une implication plus forte et plus interdisciplinaire d'une science participative à laquelle la communauté SIC doit contribuer à travers plusieurs défis.

**Compréhension des cycles bio-géochimiques des minéraux/métaux critiques.** La compréhension mécaniste du comportement des métaux à l'échelle moléculaire, de formation des minéraux à basse température (nucléation non-classique, nucléation hétérogène, croissance cristalline), ainsi que de leur altération au contact de la solution (dissolution, reprécipitation) sont indispensables en sciences environnementales. Cela s'applique aussi bien à l'étude de la mobilité et du piégeage des éléments (contaminants, métaux critiques) dans les sols et les sédiments dans des stratégies de dépollution, qu'au développement de bioréacteurs reposant sur les propriétés remarquables des interfaces solide-solutions-microorganismes dans des stratégies d'extraction biologique de métaux. C'est notamment le cas pour les métaux critiques encore trop peu étudiés.



Ces études, relevant de nombreuses disciplines de géologie, de sciences environnementales et de sciences du vivant, doivent fournir un ensemble de données intégrées pour analyser le cycle de vie des éléments critiques et mieux comprendre leurs cycles biogéochimiques et de leurs perturbations.

**Vers une activité minière plus responsable.** La surexploitation de la ressource minérale et métallique, les contaminations associées, ainsi que les enjeux géopolitiques complexes qui y sont associés nécessitent de repenser les gisements et les méthodes d'exploitation. L'exploitation de ressources secondaires (déchets miniers et industriels) et de la « mine urbaine » (produits en fin de vie) doit permettre de réduire les impacts socio-environnementaux associés à l'exploitation des ressources primaires. Il est crucial d'évaluer le potentiel d'exploitation de ces gisements (technique, économique, sociétal, etc.), de penser la collecte et le pré-traitement de ces gisements parfois très hétérogènes, et de caractériser finement la spéciation des éléments d'intérêt pour développer des procédés d'extraction adaptés. Les approches développées en sciences de la Terre sont particulièrement adaptées à la caractérisation de ces gisements anthropiques, à des fins de tri ou de



Mines de fer de Carajás au Brésil. Ces mines sont situées à proximité de Parauapebas, dans l'état du Pará, au Brésil.  
© Hervé THERY / CREDA / CNRS Images

caractérisation fine des matrices et éléments d'intérêt. En parallèle, les procédés d'extraction doivent évoluer vers des procédés plus vertueux sur le plan social et environnemental, adaptés à ces gisements singuliers. Dans cette optique, le développement de procédés biologiques ou bio-inspirés et l'utilisation des outils propres à la communauté SIC sont particulièrement prometteurs.

**Évaluation de l'impact environnemental de l'utilisation de la ressource minérale et métallique de la mine au déchet.** Les impacts environnementaux liés à l'extraction des ressources minérales et métalliques, pendant et après l'exploitation, ainsi qu'à leur transformation, leur consommation, et la fin de vie des objets qui les contiennent, sont encore mal documentés. Ceci est particulièrement vrai pour les métaux critiques, qui deviennent des contaminants émergents dans l'environnement, car la plupart n'étaient pas ou peu

présents dans la technosphère il y a encore 10-20 ans. Un effort particulier doit être mené pour évaluer les impacts environnementaux liés à l'éventuelle exploitation des fonds marins pour des métaux tels que le cobalt, le nickel ou les REEs. Ce sujet ne fait pas consensus dans la communauté scientifique, et la communauté SIC doit s'emparer du débat. Un autre exemple, encore peu étudié, concerne les particules anthropogéniques issues de l'altération des matériaux des zones urbaines artificialisées (routes, immeubles, etc.). Ces particules peuvent générer d'importants flux de poussières qui s'ajoutent aux flux de matières provenant des environnements naturels. Ces particules, qui permettent de tracer la sphère d'influence des espaces urbains, nécessitent des études minéralogiques approfondies afin de comprendre leur nature, leur réactivité biogéochimique selon les contextes de transports et de dépôt, ainsi que leur potentiel de contamination et de perturbation des écosystèmes.

## Questions transversales inter-ressources

Quatre grands défis de recherche ont été identifiés, couvrant transversalement les ressources naturelles et les stocks.

### Impact de l'anthropisation sur les ressources

L'anthropisation des milieux, i.e., la modification d'un milieu « naturel » par les activités humaines, a un impact significatif sur de nombreuses ressources naturelles. Le réchauffement climatique causé par les émissions anthropiques de gaz à effet de serre en est un exemple majeur. La projection de l'évolution future des ressources naturelles et de leurs stocks face aux changements climatiques et anthropiques constitue un enjeu crucial, nécessitant des efforts supplémentaires.

Sur le volet « eau », l'impact de l'anthropisation est particulièrement marqué sur la **cryosphère**, avec la fonte des glaciers et la réduction de l'enneigement. Un enjeu d'importance pour ces têtes de bassins versant particulières dont le stock d'eau est sous forme solide, est de quantifier et prendre en compte les impacts multiples et en cascade de cette diminution de ressource en eau douce solide, actuels et futurs, sur les ressources en eau pour les usages socio-économiques dans les massifs montagneux (e.g. eau potable, neige de culture, hydroélectricité, etc.) ainsi que plus à l'aval (e.g. irrigation, refroidissement des centrales nucléaires, etc.).

Les activités humaines ont également un **impact « physique » sur les cours d'eau** en les réaménageant pour s'en protéger ou les utiliser (e.g. pompage d'eau, création de réservoirs, seuils/obstacles, renaturation, etc.). L'évaluation globale de ces réaménagements, mais également des réhabilitations de cours d'eau (e.g. suppression d'ouvrages, aménagement de berges, etc.), reste complexe et mal connue, car ils affectent potentiellement plusieurs compartiments interconnectés (hydrologie, hydrogéologie, transport de sédiments, température de l'eau et donc les habitats et la biodiversité,

etc.). Cela requiert une approche intégrée combinant différentes sciences, telles que les sciences des systèmes de l'information et de la communication (SIC) et les sciences environnementales.

Un autre impact direct et indirect est l'**urbanisation**, qui modifie le ruissellement et réduit l'infiltration, limitant ainsi la recharge des nappes phréatiques en raison de l'imperméabilisation des sols (cf. chapitre « Zone Critique Urbaine et Péri-Urbaine » p. 88). Cette situation peut également entraîner une dégradation qualitative des eaux souterraines. Plus largement, les modifications d'usage des sols (urbanisation, **déforestation**, etc) influencent les ressources en eau et leur cycle. L'évaluation de ces impacts sur le comportement hydrodynamique des nappes et leur qualité demeure une question majeure. Anticiper et projeter les conséquences de l'évolution des usages des sols sur les ressources en eau et leurs utilisations socio-économiques nécessitent des approches systémiques combinant hydrologie, hydrogéologie, sciences économiques, politiques, SHS, sciences environnementales.

À l'inverse de l'anthropisation « dénaturante », des efforts ont été faits ces dernières années pour renaturer certaines zones humides, essentielles pour la biodiversité et la régulation des cycles de l'eau. Ces zones, souvent comblées ou drainées par le passé pour rendre utiles des parcelles impropres à l'agriculture ou aux aménagements urbains, jouent un rôle crucial dans la réception, le stockage, et la restitution de l'eau, ainsi que dans la filtration naturelle des bassins versants. Cependant, l'effet des **restaurations des zones humides à différentes échelles spatio-temporelles, et notamment leur effet cumulé** est encore mal connue.

Plus globalement, il est nécessaire de poursuivre les efforts pour **mieux comprendre, caractériser et simuler les socio-hydrosystèmes**, tant dans les bassins versants mais aussi aux interfaces Terre-Mer. Il s'agit de prendre en compte le climat, les influences humaines (e.g. irrigation et les stockages, changement d'usage des sols comme la déforestation, etc.), ainsi que les problématiques socio-économiques, de santé (e.g. contamination etc.) ou d'énergie. Les systèmes dynamiques, les simulations multi agents, les boucles de rétroaction et les schémas conceptuels sont autant d'approches qui mériteraient d'être renforcées pour modéliser les trajectoires des socio-hydrosystèmes. Dissocier les différentes pressions sur la ressource en eau (demande en eau potable, besoins en énergie, irrigation, besoins des écosystèmes, etc.) dans un système complexe reste un défi important.

**L'azote et le phosphore**, éléments essentiels à la vie, sont des enjeux prioritaires. Sous l'effet des activités humaines, leurs cycles biogéochimiques sont perturbés, entraînant des dommages environnementaux graves (anoxie des océans, eutrophisation des eaux douces continentales, prolifération d'algues vertes, etc.). Les principales sources d'émission d'azote proviennent des engrais azotés, de la combustion des ressources fossiles et des procédés industriels, tandis que le phosphore est principalement émis par l'agriculture (fertilisants, effluents d'élevage)

et les eaux usées urbaines (excréments et détergents). Cependant, la part respective de ces différents secteurs (agriculture, industrie, urbanisation) sur ces perturbations est mal connue.

Les effets des changements des pratiques agricoles, et des apports en azote et phosphore sur les **stocks de carbone à long terme**, notamment la fraction labile et réfractaire, restent également peu étudiés. **Un enjeu crucial serait de modéliser l'évolution des ressources en carbone en intégrant des modèles climatiques et macro-économiques.**

### Interactions entre les ressources - Nexus

Plusieurs nexus entre ressources, comme Biomasse/Energie, Ressources en sol/Carbone (i.e. biochar : charbon végétal obtenu par pyrolyse, qui améliore la fertilité et la structure des sols), Minéral/Energie/Eau, jouent un rôle crucial dans la Zone Critique et leur étude par la communauté SIC est en croissance. Un exemple emblématique d'interaction forte entre ressources sous-tendant la soutenabilité des sociétés humaines est celui de l'interface sol-eau, en lien avec les cycles biogéochimiques et la production agricole.

**Les sols sont une ressource non renouvelable à court terme (50-100 ans).** Ils fournissent de nombreux services écosystémiques essentiels, tels que le stockage du carbone, le soutien à la production agricole. Ils participent entre autres au stockage et à l'acquisition de la composition chimique de l'eau. Les sols sont, par définition, un système où les interactions sont nombreuses, que ce soit entre les cycles (eau, C, N, etc.) ou avec les sociétés humaines. Améliorer notre compréhension de ces interactions nous aidera à mieux préserver cette ressource. Les sols constituent donc des systèmes complexes nécessitant l'application d'approches croisées de chimie, physique, et de biologie. Cependant, dans la majorité des sols à travers le monde, les mécanismes impactant leur dynamique sont largement influencés par les activités humaines, qui exploitent cette ressource pour produire principalement de la biomasse (nourriture, énergie). Par conséquent, **une implication accrue des SHS dans l'étude des sols** est nécessaire pour avoir une compréhension holistique de cette ressource.

Travailler sur les **interactions entre les cycles, comme le cycle du C, de l'N et de l'eau**, nécessite une compréhension approfondie des cycles et de leurs interactions, tout en prenant en compte les changements d'usage des sols. Il est important de noter que ces interactions se produisent à différentes échelles d'espace (e.g. réactions élémentaires, parcelle, bassin versant, territoire, continent et global). Le développement d'outils numériques permet de mieux comprendre les interactions entre les cycles à différentes échelles, mais ces modèles n'ont de sens que s'ils sont validés par des données robustes (cf. chapitre « Intégration des différentes échelles d'espace et de temps dans l'étude des SIC » p. 50). Ces données doivent être produites selon des normes de qualité élevées et être accessibles à l'ensemble de la communauté scientifique pour maximiser leur

utilité. Ce travail de production et de mise à disposition des données est un processus long qui nécessite des ressources adéquates (cf. chapitre « Données en SIC » p. 104). La structure socio-économique de la recherche, de plus en plus orientée vers des contrats et des projets à court terme, introduit un biais qui pourrait affecter notre capacité à relever ces défis du XXI<sup>e</sup> siècle.

**L'irrigation** a permis d'augmenter la productivité agricole dans de nombreuses régions du monde, mais elle est souvent pratiquée de manière non durable, notamment par la surexploitation des aquifères, dont les stocks diminuent, et des eaux de surface. Il est urgent de réviser les critères de planification des usages agricoles de l'eau en tenant compte des prévisions hydro-climatiques sur les prochaines décennies, d'augmenter les incitations et les investissements pour économiser l'eau dans les bassins menacés par le stress hydrique. L'adaptation des agrosystèmes au changement climatique implique de **repenser les types de culture et d'élevage pour minimiser la surexploitation des ressources**, notamment en eau, par exemple en réduisant la production de viande rouge nécessitant des cultures irriguées, et en adoptant des variétés et des pratiques plus économes en eau. Les solutions doivent prendre en compte conjointement les effets sur les ressources en eau, la biodiversité, le climat, ainsi que leurs impacts socio-économiques.

Les agrosystèmes sont de plus en plus sollicités pour rendre des services aux sociétés humaines, qui dépassent leur objectif premier de produire de la nourriture. Certains de ces services peuvent parfois entrer en conflit avec la production alimentaire. Par exemple, le stockage de C dans les sols, en tant qu'outil d'atténuation du changement climatique, peut dans certains cas s'opposer à la production alimentaire. Tous ces services additionnels peuvent donc potentiellement entrer en conflit les uns avec les autres. Pour trouver des solutions innovantes qui optimisent les services rendus par les sols, une vision intégrée et holistique est indispensable. **L'optimisation des services rendus par les agrosystèmes** implique souvent des compromis, dont l'équilibre dépend également de choix politiques et économiques. Par exemple, des changements de régimes alimentaires réduisant la proportion de protéines animales ont un impact sur les pratiques agricoles. Dans la plupart des pays développés, cet impact est positif et synergique avec une amélioration de la santé humaine et environnementale. Les orientations politiques, à l'échelle européenne et nationale, influencent également les pratiques. Travailler en interactions avec d'autres disciplines est donc essentiel pour relever les défis auxquels sont confrontés les agrosystèmes.

### Incertitudes, amélioration des modèles et méthodologies pour l'étude des ressources et des stocks

Un des enjeux majeurs liés au suivi et à l'estimation des stocks et des ressources réside dans la caractérisation des incertitudes qui y sont associées. Les principales sources d'incertitudes sont liées à la caractérisation et/ou l'estimation des ressources/stocks à l'échelle de la mesure

ou de l'observation dans les réseaux, à l'extrapolation ou la spatialisation de ces dernières à des échelles spatio-temporelles plus larges ou sur des milieux plus ou moins hétérogènes, à la méconnaissance de certains processus et/ou milieux d'études, aux problèmes de conceptualisation et de transcription des processus dans les modèles de ressources et à la résolution numérique de ces modèles.

Les données et les observations sont essentielles pour le suivi et la prévision des ressources, ainsi que pour leur modélisation physique. Beaucoup de données utiles dans ce contexte sont encore peu mesurées, de qualité médiocre, ou sur une durée trop courte, avec un

Bac de rétention sur la mine de Poro, en Nouvelle-Calédonie. Dans cette collectivité française, les altérations superficielles des roches ultrabasiqes, roches magmatiques très pauvres en silice, sont exploitées pour le nickel. L'extraction s'effectue dans des mines à ciel ouvert, après décapage du couvert végétal, des sols et des terrains superficiels stériles, pour atteindre les roches fertiles. Le projet « Dispersion des métaux de la mine au lagon » s'intéresse aux poussières atmosphériques et aux particules transportées par ruissellement, qui accompagnent ces activités minières. La question de la dispersion des métaux dans l'environnement est étudiée en utilisant en premier lieu des lichens comme bioindicateurs des émissions atmosphériques, mais aussi des séquences sédimentaires permettant d'aborder l'impact minier sous un aspect historique.

© Fabrice MONNA / ISEA / ARTeHIS / Biogeosciences / CNRS Images



échantillonnage spatial et/ou temporel insuffisant. Les réseaux de mesure doivent être conçus pour minimiser ces limites, que ce soit en matière de **collecte de données, de qualification, de partage à long terme, ou de développements instrumentaux pour mesurer de nouvelles variables ou améliorer la précision des mesures existantes.**

De plus, de **nombreuses ressources sont impactées par le changement climatique** (e.g. eau, carbone etc.), et la projection de leur **évolution future dans ce contexte reste un défi majeur.** Le suivi et la prévision des ressources, sur des périodes allant de quelques semaines à plusieurs décennies, reposent généralement sur des modèles numériques physiques, complexes et coûteux en temps de calcul. Le développement de nouvelles approches méthodologiques ou l'amélioration d'approches existantes, telles que l'analyse de sensibilité, l'analyse des incertitudes ou l'assimilation de données, restent attrayantes. Le développement de l'intelligence artificielle (IA) offre également de nouvelles opportunités, mais il est crucial d'évaluer les véritables bénéfices de l'IA, ainsi que les risques potentiels associés, tels que l'aspect « boîte noire » et la perte de compréhension des processus.

De nombreuses ressources étant déjà largement anthropisées (e.g. prélèvements, retenues pour les ressources en eau), le développement de modèles physiques capables d'intégrer cette anthropisation, ainsi que des données nécessaires à leur caractérisation, est un enjeu crucial pour fournir des informations pertinentes à la société sur l'évolution potentielle de ces ressources. La question du transfert d'échelle est très importante dans ce contexte. Il faut pouvoir extrapoler (« *upscaling* ») les informations obtenues à partir de mesures locales à de plus grandes échelles (e.g. passer de l'échelle d'un petit bassin versant bien instrumenté à celle d'un bassin versant plus vaste avec moins de mesures ; cf. chapitre « Intégration des différentes échelles d'espace et de temps dans l'étude des SIC » p. 50). Inversement, répondre aux questions sociétales à l'échelle territoriale nécessite le développement de méthodologies permettant de descendre en échelle (« *downscaling* ») à partir des informations souvent fournies à une échelle plus grossière par les chaînes de modélisation existantes.

Dans le contexte d'une utilisation raisonnée des ressources, les aspects qualitatifs et quantitatifs sont indissociables : une ressource abondante mais de mauvaise qualité, tout comme une ressource rare de très bonne qualité, posent des difficultés de gestion différentes. Il est donc crucial de **mieux intégrer les aspects de qualité et de quantité dans les modèles**, afin de produire des évaluations cohérentes, à la fois qualitatives et quantitatives.

### Observation & ressources naturelles

Il est nécessaire d'incorporer les activités humaines et les forçages anthropiques dans les modèles de surface afin d'améliorer la représentation des cycles biogéochimiques, des stocks et des usages. Pour ce faire il est indispensable de **développer des approches pour**

observer les interventions humaines sur ces cycles et sur les ressources naturelles sur le long terme et sur de vastes espaces. Ces observations sont nécessaires pour développer et évaluer les paramétrisations représentant les perturbations humaines telles que les prélèvements d'eau, les aménagements hydrauliques, la dynamique de l'occupation du sol et leurs impacts sur la partition ruissellement/drainage, etc. Dans ce contexte, les missions spatiales récentes (e.g. SWOT) ou à venir (e.g. BIOMASS, TRISHNA) en lien avec les réseaux d'observation *in situ* et les infrastructures labellisées offrent une opportunité unique d'étudier l'empreinte humaine sur les cycles de l'eau et du carbone et sur les ressources associées.

Étant donné les enjeux liés aux eaux souterraines, dont l'usage croît notamment en agriculture, il est indispensable d'améliorer leur suivi. Les bases de données qui agrègent les observations sur la qualité et le niveau des nappes souterraines, comme la base ADES en France, bien qu'incomplètes et de qualité variable, sont d'une grande utilité pour la communauté. Les enjeux résident dans le maintien et le renforcement des réseaux de piézomètres, qui sont en diminution, ainsi que le développement de méthodes de suivi alternatives, notamment à distance, grâce aux données gravimétriques issues de missions dédiées (GRACE) ou par l'analyse opportuniste de la trajectoire de satellites, non dédiés à la mesure du champ de gravité, en extrayant des informations sur le champ de gravité terrestre.

Concernant les sciences participatives, leur développement peut entraîner des évolutions majeures dans l'analyse et le traitement des données en lien avec l'utilisation des stocks et des ressources. Les futurs défis incluront la nécessité de profils capables de concevoir des approches, d'intégrer, d'analyser et d'exploiter des données de nature radicalement différente en termes de qualité et de continuité. De nouvelles compétences, collaborations et formations

seront essentielles pour trier et obtenir des données fiables et répétables à partir de sources discontinues, et les transformer en données scientifiques exploitables à partir d'observations citoyennes. Ceci nécessitera de nouveaux outils statistiques, des méthodes de traitement de données, une évaluation de la pertinence des approches quantitatives par rapport aux approches qualitatives, des méthodes de standardisation, des capteurs automatiques, et une collaboration accrue avec les sciences humaines et sociales pour formaliser et traduire les attentes de la recherche pour l'observation citoyenne. En outre, la multiplication des « Living Labs » contribue également à sensibiliser le grand public aux grands enjeux environnementaux et à soutenir les actions de sciences participatives autour des écosystèmes et socio-écosystèmes. L'intérêt des nouvelles structures et nouveaux modes de communication est indéniable. La communauté identifie des besoins pour les réseaux participatifs d'observation notamment autour des assecs, les mesures piézométriques, les mesures de précipitation (en milieu urbain par exemple), la neige (en montagne) et les changements d'occupation des sols et des pratiques agricoles.

À long terme, il est nécessaire de reconstituer des données d'archives décrivant l'état et la variabilité des stocks et des usages (exploitation d'images déclassifiées, archives sédimentaires, rapports d'archive, etc.).

Plus largement, la question du rôle des observatoires existants dans l'évaluation des ressources et des stocks se pose. Les observatoires pourraient être élargis, par exemple pour inclure la quantification de la biomasse et des activités microbiennes (flux dont l'altération), ou encore l'étude des flux verticaux de matières entre compartiments de surface et le sous-sol. Cependant, la question de la sobriété et de la préservation des ressources invite la communauté à réfléchir au coût d'accès aux sites d'observations, et aux coûts d'acquisition, de traitement et de stockage des données.

## Forces et opportunités

Afin d'améliorer la qualité des sols dans l'union européenne, une proposition de directive de la Commission relative à la surveillance et la résilience des sols devrait être publiée en 2024 avec l'appui de membres de la communauté SIC. Celle-ci devra s'approprier largement cette directive et accompagner sa mise en œuvre par des actions de recherche portant notamment sur les sols dégradés et/ou contaminés.

Nationalement, depuis 2022, plusieurs programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) exploratoires, soutenus par l'État via France 2030 et suivis par l'ANR, ont émergé dans le paysage de la recherche. Ces programmes visent à soutenir une politique scientifique sur des domaines d'intérêts national et européen, avec des retombées potentielles multiples.

Deux d'entre eux concernent principalement les SIC et contribuent à soutenir significativement la recherche française sur les surfaces et interfaces continentales, avec des effets transformateurs attendus dans les 6 à 10 ans :

- **FairCarbon (2021)** : Ce programme s'intéresse au cycle du carbone, afin d'identifier des leviers — écologiques, agronomiques, socio-économiques — et scénarios de trajectoires pour atteindre la neutralité carbone et restaurer les ressources naturelles dans les écosystèmes continentaux.
- **OneWater Eau Bien Commun (2021)** : il s'agit d'un programme national de recherche sur l'eau douce continentale, visant à accélérer les transitions et mesurer les impacts des changements globaux sur les socio-hydro-écosystèmes.

D'autres PEPR ont un lien avec les travaux du domaine SIC :

- **IRIMa (2022)**: Ce programme vise à formaliser une science des risques pour contribuer à l'élaboration d'une nouvelle stratégie nationale de gestion des risques et des catastrophes, à l'ère des changements globaux.
- **TRACCS (2023)**: Ce programme ambitionne de jouer un rôle majeur dans la structuration et la valorisation de la communauté française des sciences du climat, notamment dans l'étude et de la modélisation de l'évolution du climat et de ses impacts, jusqu'au développement des services climatiques.

- **TRANSFORM (2024)**: Le PEPR TRANSFORM vise à explorer les conditions de la perte d'habitabilité de la Terre, à produire des connaissances pour la transformation et à développer de nouvelles façons de construire l'habitabilité en éliminant les obstacles à la transition vers une habitabilité soutenable.
- **SoluBioD (2024)**: Le programme de recherche sur les Solutions fondées sur la Nature, vise à promouvoir des approches scientifiques renouvelées pour accompagner des changements profonds de conception, mise en œuvre et évaluation des Solutions fondées sur la Nature (SfN), et l'émergence d'un nouveau secteur économique avec de fortes retombées sociales et environnementales.

## Recommandations

La notion de « ressource » est intrinsèquement interdisciplinaire, impliquant plusieurs instituts du CNRS (INSU, CNRS Écologie & Environnement, CNRS Ingénierie, CNRS Biologie, CNRS Sciences humaines et sociales, CNRS Chimie) et trois domaines de l'INSU (SIC, TS et OA). Faire dialoguer, voire de les faire se rencontrer, les chercheurs et chercheuses de ces différentes thématiques reste un enjeu. Les ZA et les OHM, des outils d'incitation, de soutien et d'organisation de l'interdisciplinarité, doivent être une source d'inspiration. On pourrait également s'appuyer sur les OSU et leur réseau d'observations associée (SNO) qui offrent des perspectives de recherche transversale et interdisciplinaire sur de nombreux aspects. Il s'agirait d'organiser des ateliers et des AAP de la MITI pour favoriser l'interdisciplinarité sur la question des ressources naturelles et des stocks.

En matière de **formation**, il serait pertinent de créer et de renforcer des **masters interdisciplinaires**, afin de développer une vision intégrée des nexus pour la gestion et le partage des ressources sur les interfaces entre l'eau, l'énergie, la santé et la sécurité alimentaire, vision qui dessine la science de la durabilité (cf. chapitre « Formations — Métiers — Compétences » p. 134).

### Références

- Boude J.P. & Chaboud C., 1993. *Le concept de Ressource Naturelle en Economie*. [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/pleins\\_textes\\_6/colloques2/42125.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/colloques2/42125.pdf)
- Hamaide B., Faucheux S., Neve M. et al., 2012. *Croissance et environnement : la pensée et les faits. Reflets et perspectives de la vie économique*, 2012/4 (Tome LI), p. 9-24. <https://doi.org/10.3917/rpve.514.0009>
- Jollivet M. & Pavé A., 1993. *L'environnement: un champ de recherche en formation*, *Nature sciences et sociétés*, 1-1, 6-20. <https://www.nss-journal.org/articles/nss/pdf/1993/01/nss19930101p6.pdf>
- Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W., 1972. *The Limits of Growth*. <https://www.clubofrome.org/publication/the-limits-to-growth/>
- Rockström J. et al., 2009. *A safe operating space for humanity*. *Nature*, 23 septembre 2009. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Rotillon G., 2005. *Économie des ressources naturelles*. Ed. La découverte, 123 pp. <https://duddal.org/files/original/3b67e4ef591b2485d4a9d88ee71e8e8540c647af.pdf>
- Rotillon G., 2022. *Les ressources naturelles en économie : de la rareté au trop plein?*. *Ecole Chercheur : Quelles sciences face aux impératifs de la durabilité*. <https://www.youtube.com/watch?v=IDJsFxeKye4>



# Les enjeux

De l'échelle planétaire à celle des territoires, les écosystèmes sont soumis à des contaminations, multiples, anciennes ou émergentes, qu'il s'agisse de pollutions chimiques, microbiologiques et/ou physiques, auxquelles s'ajoutent les effets des changements globaux. Dans ce contexte, les limites planétaires imposent de concilier soutenabilité, préservation de la qualité des écosystèmes et de leurs ressources (notamment eau, sols, biodiversité) en lien avec les évolutions de nos sociétés. Face à ces enjeux, la communauté SIC doit s'approprier des concepts émergents tels que « **One Health** », « **Eco-Health** », « éco-exposome », « santé planétaire », « **One Earth** », « habitabilité », pour leur définition et l'intégration de nos expertises de recherche dans ces démarches et concepts. Renforcer les démarches interdisciplinaires « sciences de la terre et du vivant — santé — sciences humaines et sociales » et transdisciplinaires « sciences-société » apparaît crucial pour y parvenir. L'intégration des recherches sur les contaminants et les pollutions dans une démarche systémique, en relation avec les trajectoires des socio-écosystèmes, viserait à mieux prendre en compte l'évaluation, la perception et l'acceptabilité des risques et des solutions (e.g. remédiation, restauration, réhabilitation, réutilisation), et à travailler en cohérence sur des indicateurs d'état et de santé des écosystèmes et des outils d'aide à la décision.

Depuis quelques décennies, de nouvelles substances chimiques préoccupantes sont apparues du fait de nouveaux usages et de nouveaux produits, et ont largement contaminé non seulement notre environnement, mais aussi tous les organismes vivants, y compris les humains. Certaines substances sont considérées comme des polluants éternels, comme les micro- et nanoplastiques, ou les PFAS qui s'éliminent très lentement. D'autres se dégradent plus rapidement, générant des produits secondaires souvent mal caractérisés et à la nocivité peu ou pas connue. Comprendre le devenir et l'impact de ces nouveaux contaminants est urgent et ne doit pas attendre l'émergence de crises sanitaires. L'exposition chronique d'organismes vivants à plusieurs contaminants, souvent présents à faible dose, semble devenir la norme plutôt que l'exception. La nécessité de mieux comprendre et de prédire les effets de l'exposition chronique à de faibles doses et les « effets cocktails » est un front de science transversal incontournable. Ces questions deviennent d'autant plus prégnantes dans le contexte des changements globaux, où s'ajoute le besoin d'intégrer les réponses du vivant soumis à des stressseurs multiples : chimiques, biologiques et physiques (contaminants ou altéragènes). L'un des enjeux scientifiques auxquels fait face la communauté SIC est de prendre en compte et d'évaluer le devenir et les effets de ces multiples stressseurs sur la santé environnementale et le fonctionnement des écosystèmes (Figure 1, p. 75). Les questions relatives aux transferts et au devenir

des contaminants à différentes échelles spatiales et temporelles (cf. chapitre « Intégration des différentes échelles d'espace et de temps dans l'étude des SIC » p. 48), dans et entre les compartiments abiotiques et biotiques, nécessitent de renforcer nos connaissances et la prédiction des interactions abiotiques/biotiques, des effets de rétro-actions, des effets de cascade et de la bioaccumulation dans les réseaux trophiques. Une attention particulière doit être portée sur les transferts entre écosystèmes et les interfaces associées pour mieux comprendre les impacts et les trajectoires.

La communauté SIC travaillant sur les contaminants et les pollutions fait aussi face à des enjeux de structuration et d'évolution de ses forces vives, vis-à-vis de son vivier de compétences, de ses plateformes techniques et de ses grandes infrastructures, de ses observatoires, et de ses sites et terrains d'étude. Par exemple, comment structurer notre communauté autour des plateformes sans devenir de simples prestataires de service ? Comment fédérer des recherches interdisciplinaires et transdisciplinaires autour des observatoires, tout en intégrant mieux les recherches au Sud, et dans les milieux extrêmes, en adaptant une vision « **One Earth** » ?

Face aux enjeux sociétaux liés aux pollutions, la communauté SIC joue un rôle particulier et se pose des questions sur la manière d'agir face à ces défis, y compris en période de crise. Il est essentiel de déterminer les démarches à adopter pour mieux communiquer et transférer l'information de manière efficace au grand public ainsi qu'aux instances décisionnaires ou gestionnaires. Ce rôle doit davantage tenir compte de notre expertise tout en maîtrisant l'information scientifique et le positionnement des chercheurs vis-à-vis de la société. Par exemple, comment faire en sorte que nos recherches contribuent réellement au développement de produits et de composés à faibles impacts en termes de contaminants, de modes d'exploitation ou de systèmes industriels moins polluants, ainsi qu'à la création de matériaux plus durables ou recyclables ? Comment mieux coordonner nos efforts et faire connaître notre expertise aux gestionnaires et aux acteurs de la santé ?

# Les questions scientifiques

## Processus dans la Zone Critique : contaminants, milieux et contextes d'intérêt émergents

### Les contaminants dans des milieux en transition : y a-t-il des milieux à prioriser ?

Des progrès importants ont été accomplis ces dernières années sur la compréhension et la prédiction du devenir des contaminants réglementés ainsi que sur leurs effets dans les compartiments principaux de la Zone Critique que sont les sols et les eaux de surface. Des avancées restent toutefois nécessaires en ce qui concerne les milieux aux caractéristiques peu répandues (e.g. prairies d'altitude) et/ou très sensibles (e.g. mangroves et zones humides en général), les environnements de transition ou extrêmes, les environnements stratégiques (e.g. interfaces entre milieux, zones humides, milieu côtiers, estuariens, insulaires, zones non-saturées, zones karstiques, milieux de hautes altitudes et latitudes, etc. ; Figure 1). Les milieux fortement anthropisés (e.g. friches industrielles), les zones urbaines, ou encore les zones d'exploitations minières, anciennes ou actuelles, sont aussi des objets d'étude à privilégier dans le futur, notamment dans les territoires du Sud et les régions où les effets des changements globaux sur les socio-écosystèmes sont exacerbés. Plus que la priorisation de milieux particuliers, il s'agit de mieux comprendre et modéliser les effets des modifications associées à la crise climatique.

### Changements d'échelles spatio-temporelles et changements climatiques : comment revoir nos paradigmes ?

Comprendre les interactions entre les processus liés aux contaminants, qui se manifestent à différentes échelles spatiales et temporelles (du local au global), est crucial pour améliorer leur modélisation et prédire leur devenir et leur toxicité. Il est d'abord nécessaire d'identifier les échelles de temps et d'espace auxquelles se produisent les processus de contamination et de remédiation, qu'ils soient naturels ou assistés. Certains processus peuvent se dérouler simultanément à plusieurs échelles, ce qui rend leur suivi et leur compréhension particulièrement complexes. La superposition et l'interaction de ces échelles sont difficiles à intégrer, tant au niveau des processus que de la modélisation, qui, par définition, nécessite une séparation marquée des échelles pour permettre les changements d'échelle par des méthodes classiques (e.g. l'homogénéisation). Cela constitue donc un défi majeur pour une meilleure compréhension des processus de transfert et de transformation, des interactions solides/solutions/organismes, et des impacts des contaminants, entre autres, à différentes échelles. Dans ce contexte, établir des stratégies d'observation, d'évaluation et de modélisation pour ces processus multi-échelles doit être une priorité.

Les changements globaux et en particulier climatiques impactent fortement les processus liés aux pollutions surtout en termes de transfert des contaminants entre les différents compartiments de la Zone Critique et leurs impacts sur ces compartiments. Les impacts les plus visibles concernent essentiellement la temporalité et l'intensité des événements extrêmes (e.g. feux, crues, sécheresses, etc.). Par exemple, l'augmentation de la fréquence des crues se répercutera forcément sur la quantité de contaminants transférés sur des phases solides dans les hydrosystèmes, de même que leur persistance dans des milieux asséchés sur de longues périodes. Le décryptage des mécanismes de transfert des contaminants entre les différents compartiments de la Zone Critique et la prise en compte de leur temporalité restent donc essentiels. Les études intégrées sur des processus hydro-bio-géochimiques et climatiques pour appréhender le devenir, la dynamique des contaminants et les trajectoires de contamination doivent devenir la règle. En termes de processus à petite échelle, le rôle des interfaces redox, des espèces réactives de l'oxygène (ROS) et des colloïdes, entre autres, dans le devenir et les impacts des contaminants organiques et inorganiques, notamment au sein des zones de transition entre compartiments environnementaux, reste encore mal compris (cf. chapitre « Intégration des différentes échelles d'espace et de temps dans l'étude des SIC » p. 48).

### « Nouveaux » contaminants, contaminants biologiques, pollutions physiques, nouvelles pratiques : quels risques associés ?

Un important défi actuel et à venir est la détection des nouveaux contaminants, souvent appelés émergents ou d'intérêt émergent, et/ou de leurs produits de dégradation. Ces problématiques se multiplient en lien avec les évolutions sociétales et la pression anthropique. De plus, leurs produits de dégradation peuvent être plus toxiques que les molécules mères. Il est donc crucial d'intégrer les processus de transformation, de dégradation et de métabolisation dans l'évaluation de leur impact sur l'Homme et les écosystèmes. Il s'agit notamment de molécules pharmaceutiques, des PFAS, des micro ou nanoplastiques, d'éléments trace métalliques technologiquement critiques. À ces contaminants chimiques s'ajoute l'exposition, simultanée ou séquentielle (multistress), à des contaminants biologiques (virus, bactéries et champignons pathogènes, toxines, agents transmissibles non conventionnels, etc.) ou à des pollutions physiques (e.g. rayonnements, ondes électromagnétiques, lumière, bruit, etc. ; Figure 1). Au-delà de l'analyse classique *a priori* des substances et dérangements, il est nécessaire de développer de nouvelles approches méthodologiques, telles que les analyses non ciblées ou dirigées par les effets, pour mieux caractériser les cocktails auxquels les organismes sont exposés. Un autre défi majeur est l'évaluation des

risques environnementaux et sanitaires associés à ces contaminants, ainsi qu'aux effets combinés potentiels résultant des multi-expositions.

Certains polluants sont liés à la transition énergétique et numérique (e.g. terres rares, éléments métalliques technologiquement critiques, lithium, etc.) et leur utilisation ainsi que leur recyclage vont augmenter. Cela entraînera des modifications de leurs flux et de leurs cycles biogéochimiques, avec un risque potentiel de pollution environnementale. En milieu urbain, les activités domestiques contribuent de manière significative à la présence de contaminants. Comme il est actuellement difficile de déterminer lesquels cibler en priorité, il semble pertinent, au moins dans un premier temps, de promouvoir le développement d'approches plus globales et non ciblées. De plus, les changements globaux et les transitions sociétales imposent de nouvelles pratiques (comme la réutilisation des eaux grises ou usées) dont les risques de contamination associés, incluant le devenir et la transformation des contaminants, la présence d'organismes pathogènes, nécessitent encore une étude et une documentation approfondies.

### Contaminants et remédiation, mitigation des impacts, valorisation des déchets: comment interagir entre communautés SIC et génie des procédés / ingénierie écologique pour répondre à l'enjeu d'une économie «verte», durable et circulaire?

L'amélioration des approches de remédiation et de mitigation de tous les impacts listés doit rester au cœur de nos préoccupations pour préserver autant que

possible tous les compartiments de la Zone Critique. Ainsi, le développement de méthodes innovantes (atténuation naturelle assistée, chimie verte, chimie durable, etc.) favorisant l'utilisation, dans un contexte d'économie circulaire, de bio-procédés de traitement/stabilisation/valorisation des différents types de déchets, de traitement de l'eau, des sols et de l'air, est aujourd'hui cruciale et nécessite une forte interaction avec le génie des procédés et l'ingénierie écologique. Il est possible de mettre à profit le métabolisme des microorganismes ou les propriétés de certains végétaux et composés d'origine biologique pour développer des stratégies et des solutions de remédiation, par définition fondées sur la nature, grâce à des partenariats avec des spécialistes de l'ingénierie des procédés et de l'ingénierie écologique. Il reste cependant à élucider le rôle des microorganismes et à identifier les métabolismes mis en jeu dans la dynamique de certains contaminants d'intérêt émergent, et à s'attacher à différencier la contribution des processus biotiques et abiotiques menant à l'atténuation naturelle des contaminations afin de mieux prédire leurs effets et, ainsi, de développer des stratégies optimales.

Ceci se fera notamment dans une démarche d'économie circulaire et de solutions fondées sur la nature, impliquant notamment les processus microbiens, connus pour contribuer significativement à la dynamique des contaminants, parfois au travers de synergies biotique/abiotique (e.g. drainage minier acide) et biotique/biotique (notamment avec la végétation). La spécificité de la communauté SIC est de pouvoir appréhender ces problématiques au travers d'approches interdisciplinaires couplées permettant d'identifier les mécanismes opérant à différentes échelles, de la molécule au bassin versant,

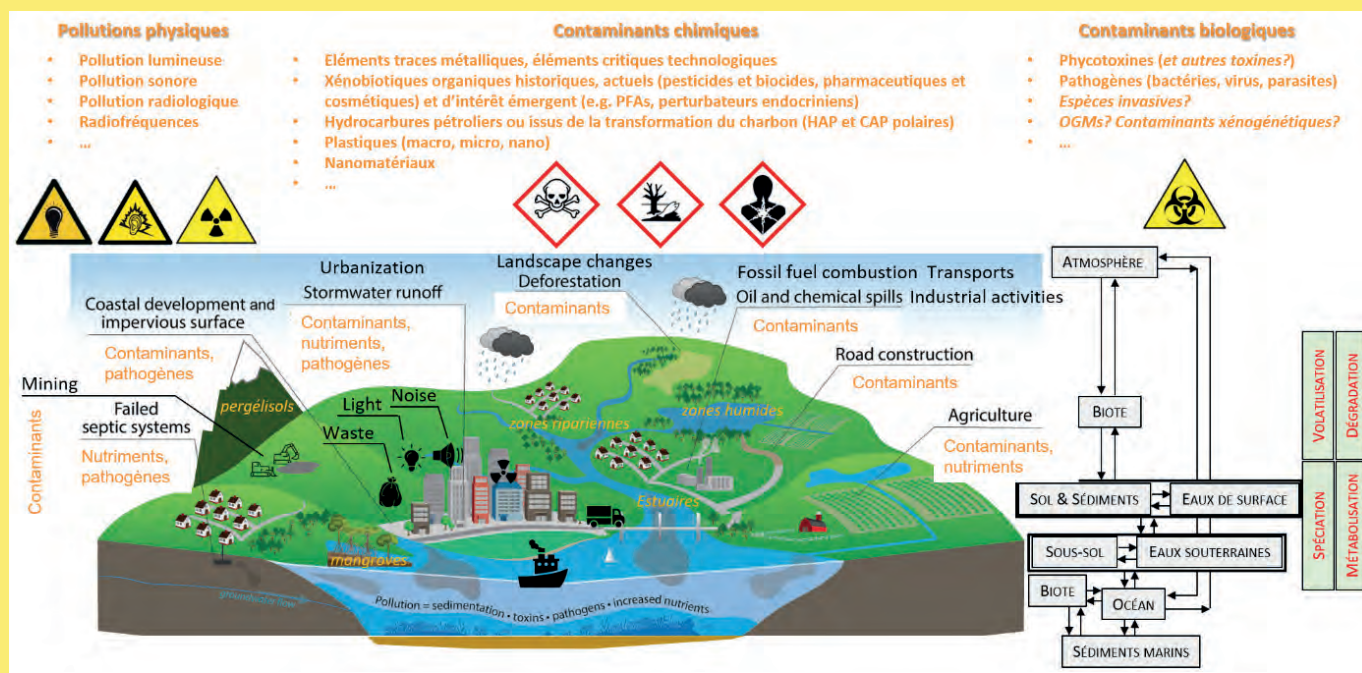


Figure 1. Schéma général illustrant les principales pollutions et contaminations dans le contexte des surfaces et interfaces continentales, leurs sources et certains des processus en jeu. Adapté de Oleson et al. (2018).



et aux interfaces vivant/non vivant. Il lui est également possible de caractériser l'intensité et les cinétiques des réactions étudiées, en prenant notamment en compte les effets aigus et chroniques que ce soit à court ou à long terme (e.g. anciens sites industriels ou miniers qui pourraient devenir des observatoires) via l'observation, l'expérimentation et la modélisation.

Une approche durable pour la gestion des contaminants passe nécessairement par le développement d'indicateurs d'impacts. L'empreinte chimique, par exemple, est une indication du risque potentiel posé par un produit sur la base de sa composition chimique, de sa toxicité pour les êtres humains et les écosystèmes des substances chimiques qui le composent, et du potentiel en termes d'exposition humaine et des écosystèmes à ces substances au cours du cycle de vie du produit. Son analyse doit comprendre une quantification complète des produits chimiques utilisés, consommés, produits ou modifiés tout au long du cycle de vie du produit, ainsi que les risques que ces produits présentent. Il est donc nécessaire de combiner la réflexion sur le cycle de vie et les approches d'évaluation des risques pour évaluer cette empreinte chimique. Ce concept n'est cependant pas suffisant s'il n'intègre pas une évaluation de la durabilité, qui intègre les notions de capacité de charge des (éco)-systèmes exposés et l'analyse comparative des impacts induits par les produits et des limites planétaires pour la pollution chimique. Le développement de ces approches holistiques passe nécessairement par une collaboration

Manipulateur plaçant un pilulier dans un passeur d'échantillons pour l'analyse d'une molécule organique par chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse (en anglais Liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS). Cette technique permet d'identifier les molécules présentes dans un échantillon par séparation sur une colonne de chromatographie et analyse par spectrométrie de masse. © Cyril FRESILLON/ICT/CNRS Images

entre (biogéo-)chimistes, (éco)toxicologues et spécialistes de l'économie circulaire (Sala & Goralczyk, 2013).

## Exposition et impact sur le vivant : du moléculaire aux écosystèmes

**Mieux quantifier les impacts sur le vivant des stress multiples (chimiques/biologiques/physiques), des « effets cocktails » et des contaminations chroniques (diffuses) à faibles doses**

Pour mieux quantifier les impacts sur le vivant des stress multiples, des « effets cocktails » et des contaminations chroniques à faibles doses, il semble nécessaire d'améliorer le réalisme des conditions d'exposition

(doses, durée et voies d'exposition, multi-expositions, changements globaux, etc.) dans les expérimentations ainsi que les capacités de prédiction des impacts des « effets cocktails » dans un cadre d'expositions et de stressseurs multiples.

Une caractérisation exhaustive de toutes les expositions aux contaminants semble actuellement utopique, et la mesure holistique des réponses biologiques à différentes échelles constitue également une tâche d'une ampleur considérable. Malgré les avancées continues, l'étude des « effets cocktails » et des « effets multi-stresseurs » est limitée par des contraintes à la fois logistiques (e.g. multiplication des expérimentations pour couvrir toutes les combinaisons de co-expositions et les réponses dominées par les effets des contaminants prédominants : les plus toxiques ou ceux présents en concentrations élevées) et théoriques (e.g. manque de données (géo)chimiques et de toxicité pour de nombreux composés, informations souvent restreintes à quelques organismes modèles, et généralement obtenues par des tests mono-substance en laboratoire).

Plusieurs pistes se dessinent toutefois pour surmonter ces verrous : notamment la poursuite du développement des analyses non-ciblées à la fois pour la caractérisation des composés chimiques et biochimiques dans l'environnement et la généralisation des analyses « métaboliques » sur le biote pour la caractérisation des effets aux différents niveaux d'organisation. La définition de proxys d'ensemble, sur la base d'espèces sentinelles/bioindicatrices et d'indicateurs biologiques pour le volet biotique, et de « signatures chimiques » caractérisées par des contaminants « représentatifs » ou d'« empreintes physico-chimiques » représentatives du cortège de composés et autres stressseurs présents dans les milieux pour le volet abiotique apparaît également comme une perspective de travail.

Le couplage des mesures physico-chimiques et biologiques dans les suivis observationnels, ainsi que l'intégration des approches expérimentation-suivi *in situ*-modélisation, sont des démarches essentielles à privilégier. Bien que l'observation des effets *in situ* soit limitée par le manque de mesures et de prélèvements, ainsi que par les défis liés à l'échantillonnage et au stockage (avec les coûts associés), cette approche demeure une priorité pour la communauté. Il est crucial de prendre en compte l'impact combiné des stressseurs environnementaux, en interaction avec les contaminants, sur la diversité, l'activité, le métabolisme, les allocations d'énergie et l'immunité des organismes dans les travaux futurs.

### Identifier les limites de la résistance et de la résilience des écosystèmes dans un contexte multi-stress

L'identification des limites à la résistance et à la résilience des écosystèmes, notamment dans un contexte multi-stress, reste une gageure. Identifier les points de bascule requiert d'établir des états de référence et les connaissances sont encore insuffisantes sur les différents compartiments concernés, les différents contaminants et

les métabolites et produits de transformation en jeu, ou encore sur les traceurs à considérer. Le développement de la paléo-écotoxicologie ouvre des perspectives pour ces enjeux, de même que l'application de techniques omiques spécifiquement sur les questions de changement de régime de fonctionnement ou le couplage d'approches de modélisation basées sur des outils existants ou à développer (e.g. relations BEF — biodiversité et fonctionnement des écosystèmes, modèles écosystémiques, DEB-Tox et DEB-isotopes — dynamic energy budget : réponses métaboliques). Aux échelles des populations et des communautés, la compréhension des impacts des pollutions pourrait s'appuyer sur l'étude des traits, de leur combinaison ou des contraintes amenant à leur sélection, ou encore sur l'étude de leurs conséquences sur les flux de matière, d'énergie et de contaminants. Comment évoluer vers des applications en termes de gestion ? Ici aussi les enjeux relatifs à l'utilisation de biomarqueurs, de bioindicateurs ou de biosentinelles restent prégnants de même que le développement d'approches de modélisation pour fournir des supports de prédiction des impacts et d'évaluation des risques.

La compréhension des processus qui affectent la santé des écosystèmes est aussi limitée par le manque d'intégration des connaissances sur certains des stressseurs environnementaux, notamment les pollutions « physiques » comme les rayonnements (ionisants), les radio-fréquences, les pollutions lumineuse ou sonore. Des recherches sont actuellement développées par d'autres communautés ou sont en émergence au sein de la communauté SIC mais restent encore peu mobilisées pour étudier leurs impacts, en particulier en interaction avec les pollutions chimiques, sur le fonctionnement des écosystèmes.

Parallèlement, des obstacles subsistent pour évaluer les impacts des contaminants biologiques tels que les pathogènes, les gènes de virulence, les gènes de résistance, ainsi que les phycotoxines et cyanotoxines sur les écosystèmes. Les interactions entre contaminants biologiques et contaminants chimiques au sein des écosystèmes reçoivent une attention croissante, mais il est nécessaire de renforcer cette recherche. Il est crucial de comprendre comment les contaminants chimiques et la pollution physique affectent l'écodynamique et les impacts des contaminants biologiques sur le biote, et inversement. Comment ces interactions et leurs conséquences sur la santé des écosystèmes et sur la santé environnementale évolueront-elles dans un contexte de changements globaux ? Les communautés travaillant sur les contaminants biologiques et celles travaillant sur les contaminants chimiques convergent progressivement autour du cadre « One Health » et du concept d'éco-exposome (cf. chapitre « Bilan de la dernière prospective » p. 12). Les perspectives de recherche sont vastes et pourraient bénéficier de travaux réalisés sur des sites de « démonstration », où des problématiques de santé humaine et/ou animale sont identifiées, facilitant ainsi le passage à l'action. Cependant, le développement de ces travaux nécessiterait une cartographie précise des



acteurs et des ressources disponibles sur les territoires (e.g. interlocuteurs, acteurs, réseaux, expertise, etc.). Caractériser et comprendre les conséquences des contaminations sur le fonctionnement et la santé des écosystèmes, ainsi que leurs impacts sur l'exposome (chimique et biologique) humain et la santé humaine, constitue un champ de recherche crucial à développer.

### **Améliorer la prise en compte des effets inter- et trans-générationnels**

Quelles sont les conséquences aux « grandes » échelles des événements biologiques ayant lieu aux « petites » échelles et inversement ? Nos efforts doivent se poursuivre sur la compréhension, d'une part, des mécanismes d'action et leur intégration aux différentes échelles et, d'autre part, de la dynamique des interactions biotique-abiotique du niveau moléculaire aux flux à l'échelle écosystémique. Maintenir les efforts d'acquisition de connaissances dans un cadre de recherche intégrant les relations écologie-évolution et les développements en modélisation (e.g. modèles TK-TD et modèles populationnels et communautés) apparaît comme une nécessité. Comment suivre les réponses des populations et des communautés d'organismes sur le long terme ? La mise en place du programme See-Life du CNRS Écologie & Environnement sur le suivi à long-terme des organismes vivants pourrait être l'outil permettant de mieux contraindre les effets à long terme des polluants. Une attention particulière doit être portée aux conséquences inter- et/ou trans- générationnelles de l'exposition aux contaminants et aux effets décalés ou indirects. Il conviendrait de favoriser les recherches

pluridisciplinaires, où l'impact d'une pollution ne serait pas uniquement regardé sur un groupe d'organismes, mais au contraire sur des réseaux trophiques entiers ou sur des holobiontes (ainsi que sur la société, cf. chapitre « Continuum Sciences-Société et Transdisciplinarité » p. 114). Le développement du concept d'éco-exposome (cf. chapitre « Bilan de la dernière prospective » p. 12) permettrait d'expliciter ces effets du point de vue théorique pour améliorer leur prise en compte.

### **Améliorer nos connaissances sur la spéciation, la biodisponibilité, la métabolisation et le transfert des contaminants dans les réseaux trophiques**

Les transferts entre compartiments abiotiques, entre compartiments abiotiques et biotiques, et au sein du compartiment biotique sont contrôlés par la spéciation, la (bio)disponibilité ou encore la métabolisation (Figure 1, p. 73), qui nécessitent des travaux allant des plus petites échelles (moléculaire et nanométrique) aux macro-échelles et faisant appel à l'interdisciplinarité. Les efforts de recherche visent à combler le manque de connaissances sur les processus de dégradation/métabolisation des composés et affiner la prédiction des processus de spéciation. Ces recherches peuvent encore davantage tirer profit de l'analyse des traceurs isotopiques pour l'identification des sources et des voies de transformation des polluants dans et entre les compartiments de la Zone Critique.

Le rôle de la spéciation dans les transferts des contaminants dans les réseaux trophiques bénéficie



Prélèvement de macro- et microplastiques sur la plage des Rouleaux dans la baie Sainte-Marie en Guadeloupe, dans le cadre du projet PEPSEA (nanoParticulEs de Plastiques dans l'environnement: Source, impact et prédiction). La baie Sainte-Marie est exposée au gyre de l'océan Atlantique nord, un vaste ensemble de courants océaniques accumulant d'immenses quantités de plastiques. Parmi tous ces déchets, ce sont les nanoplastiques, dont le comportement et l'impact sont mal connus, qui intéressent les chercheurs du consortium de l'ANR-PEPSEA. Les plastiques prélevés sur cette plage recouverte de sargasses seront transformés en nanoplastiques en laboratoire, pour être ensuite étudiés.

© Cyril FRESILLON / PEPSEA / CNRS Images

d'une attention croissante. Le rôle des microbiotes, des processus de métabolisation, et des changements de biodiversité dans la biodisponibilité, les transferts trophiques et l'écodynamique des contaminants restent toutefois peu étudiés et modélisés. Quantifier les sources de contaminants et leurs transferts au sein des réseaux trophiques est également un enjeu, de même que caractériser la propagation des effets indirects et en cascade des contaminants émergents, encore mal connus.

### **Intégrer la connectivité entre les milieux, les continuums, et les flux dans l'évaluation de l'exposition et des impacts aux contaminants**

Les échelles intermédiaires des paysages anthropisés et des bassins versants, caractérisées par une mosaïque de milieux, des continuités et discontinuités ainsi que des zones d'interface, méritent davantage d'attention afin de mieux comprendre et anticiper la dynamique des contaminations et leurs impacts sur les écosystèmes. Travailler à ces échelles spatiales permet de concevoir les écosystèmes comme des continuums, plutôt que comme des systèmes fermés. Cela facilite le lien avec l'écologie fonctionnelle, en intégrant explicitement les réseaux trophiques et la dynamique des communautés biologiques dans le fonctionnement des écosystèmes.

Le renforcement des approches systémiques à des méso-échelles permettrait de mieux prendre en compte les interactions entre les êtres vivants et les flux de contaminants, sous l'influence des changements globaux. L'étude des trajectoires des écosystèmes contaminés

nécessite également de considérer le socio-écosystème et les impacts liés aux activités humaines, qu'il s'agisse de l'émission de contaminants ou des modifications de l'usage des sols et des ressources en eau, qui peuvent affecter la dynamique des polluants.

Intégrer la dimension des socio-écosystèmes permet de mieux appréhender les interactions et rétroactions entre les activités humaines, les contaminations, leurs impacts, et les mesures de gestion des risques. À ces échelles spatiales, le lien avec le concept « One Health » prend également tout son sens. Un déficit de connaissances sur les flux de nombreux polluants émergents et produits de transformation a été identifié, tout comme l'effet « réverbère » (i.e. un biais d'observation qui accorde une importance disproportionnée aux événements facilement quantifiables, au détriment de ceux qui sont plus difficiles à mesurer). Cela constitue un obstacle à l'identification des flux entre compartiments et inter-écosystèmes. Ces aspects nécessiteront le développement accru d'outils de traçage et de capteurs environnementaux, en s'appuyant sur les structures d'observation existantes pour en maximiser les bénéfices.

## **Environnement et Santé : perspectives « One Health » et « Eco-Health »**

Le changement climatique, incluant les événements de sécheresse et pluvieux extrêmes, les crues et les inondations, la raréfaction des ressources, et l'augmentation de la pression anthropique exercée sur les milieux et les territoires (e.g. érosion de la biodiversité, multi-contaminations chimiques ou microbiologiques, accidentelles ou chroniques, s'accompagnent d'une hausse des pathologies chroniques et de l'émergence ou réémergence d'agents vecteurs de maladies infectieuses (Figure 1, p. 75).

### **S'emparer du concept pour que la communauté SIC définisse le terme d'« éco-exposome » et l'« éco-health »**

La notion d'exposome a initialement été élaborée dans le domaine de la santé humaine afin de prendre en compte les différentes voies d'exposition (respiratoire, alimentaire, par inhalation, ou par contact direct) aux contaminants chimiques et biologiques, en distinguant les phases clés de la vie, et en lien avec le concept de « One Health » (une seule santé). Aujourd'hui, ce concept est perçu comme devant être élargi pour être appliqué aux écosystèmes et à leur santé. Toutefois, les définitions de cette notion suscitent encore des interrogations, et les enjeux sont nombreux, tant sur le plan conceptuel que technique.

Il reviendra à la communauté scientifique de s'approprier le paradigme de l'« éco-exposome » et de réfléchir collectivement à sa définition et aux axes de recherche qui en découlent. Les spécificités de l'éco-exposome concernent notamment les différentes échelles

d'organisation biologique (au niveau de l'individu ou de la population), les échelles temporelles (exposition ponctuelle, chronique, ou multigénérationnelle), ainsi que les échelles spatiales (contaminations multi-compartiments, milieux d'interface, et trans-écosystèmes, par exemple pour les organismes migrateurs ou les espèces ayant des stades de vie dans différents milieux). Il est également essentiel d'identifier les interactions écologiques au sein des réseaux trophiques et des communautés, telles que les espèces invasives, les rétroactions intra- et interspécifiques, ainsi que les relations avec les parasites et pathogènes.

Dans tous les cas, la problématique « Santé - Environnement » doit être abordée à l'échelle de la Zone Critique, en combinant des approches d'observation, de quantification, d'expérimentation, et de modélisation à différentes échelles, tout en développant des instruments innovants.

### **Améliorer nos connaissances des impacts sur les écosystèmes et l'évaluation de l'état de santé des écosystèmes**

Comment déterminer l'état de santé d'un écosystème, notamment en lien avec l'« éco-exposome » ? Quels sont les impacts sur le long terme d'événements de pollution, même s'ils sont transitoires, à l'échelle des populations et du fonctionnement des écosystèmes ? Ces questions cruciales restent difficiles à appréhender notamment en raison des transferts d'échelles qu'elles impliquent et des enjeux expérimentaux qu'elles soulèvent.

### **Intégrer pleinement l'expertise de la communauté SIC sur les contaminants chimiques et microbiologique et les perturbations physiques dans la problématique une seule santé (« One Health »)**

Il est donc nécessaire de réfléchir collectivement au choix de proxys « santé » pertinents (e.g. contaminants chimiques aux caractéristiques écodynamiques différentes), et/ou à des paramètres abiotiques intégrateurs de ces contaminations chimiques, susceptibles d'être suivis à haute fréquence. Ces déterminants seraient suivis sur un réseau de sites pertinents et complémentaires, dédiés à l'observation *in situ* (SNO/ OSU intégrés aux IR OZCAR et ILICO et les Zones Ateliers, rassemblées dans le RZA), et incluant les usages des bassins versants en tenant compte du type de contamination, du climat, de la démographie humaine et animale, du type de couvert végétal, etc. Ces suivis s'appuieront sur l'expertise des laboratoires pour l'analyse fine des processus en associant le monde de la santé humaine, animale et végétale (incluant les prescripteurs, vétérinaires, microbiologistes, épidémiologistes, etc.) et les partenaires socio-économiques.

### **Organiser/identifier la communauté SIC au niveau national pour une meilleure identification par les organismes et institutions en charge de la santé animale et humaine**

Répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain et ultra-marin, les sites d'observation offrent une opportunité favorable à la création d'un « Observatoire Santé-Environnement » spatialement distribué. Dans ce cadre, les indicateurs de santé pourraient être suivis parallèlement aux paramètres, souvent abiotiques, déjà surveillés à long terme. Cette approche permettrait d'analyser la dynamique spatiale et temporelle de ces marqueurs sur des sites présentant des caractéristiques contrastées, que ce soit sur le plan hydro-climatique ou en termes d'occupation des sols, incluant la démographie humaine et animale, les activités industrielles, urbaines et agricoles, et les changements paysagers.

Un tel dispositif permettrait de mieux comprendre l'impact du changement climatique, de la transition énergétique et des événements extrêmes, tout en ouvrant la possibilité de modéliser et de coconstruire des scénarios prédictifs au service de l'épidémiologie anticipative. Par ailleurs, il serait envisageable de mettre en place des systèmes d'alerte, en identifiant les périodes et les lieux où le risque d'exposition environnementale, liée aux contaminants chimiques, microbiologiques et aux gènes d'intérêt, serait plus élevé.

En complément de cette approche d'observation, une connaissance approfondie des niveaux d'imprégnation des organismes vivants (à différents niveaux des réseaux trophiques) et des populations humaines par des contaminants, qu'ils soient émergents (composés organiques émergents, éléments métalliques critiques, contaminants biologiques) ou non, est essentielle pour assurer un suivi adéquat des expositions. Une collaboration étroite avec les acteurs de la santé publique, notamment pour le suivi de cohortes et l'accès aux données épidémiologiques, renforcerait la compréhension des liens entre ces expositions et l'apparition de maladies ou de problèmes de santé spécifiques.

### **Enjeux données et modèles**

Nos recherches s'intéressent à la dynamique et à la spéciation des contaminants, dans les différents compartiments de la Zone Critique, à des fins de modélisation, en intégrant les interactions et les impacts sur les organismes vivants. Ces recherches doivent se nourrir de nombreux jeux de données acquis dans des écosystèmes variés. Pour acquérir ces données plusieurs stratégies peuvent être mises en place pour améliorer le couplage des mesures physico-chimiques et des impacts sur le vivant :

#### **Réseaux de capteurs**

Les sites dédiés à l'observation de l'INSU et CNRS Écologie & Environnement, ainsi que les LMI IRD au

Sud, offrent une variété de conditions climatiques, de niveaux et de contextes d'anthropisation permettant de développer des recherches interdisciplinaires sur les contaminants et leurs impacts environnementaux et sanitaires à différentes échelles de temps et d'espace. Ces observatoires pourraient être développés (stations expérimentales, développement instrumental à bas coût pour la mesure *in situ* haute fréquence et non ciblée de contaminants, suivi de cohortes, etc.) et mieux exploités afin de répondre à des besoins d'observation dans différents domaines : écotoxicologie, santé-environnement, développement de capteurs *in situ* haute fréquence connectés, notamment pour le suivi d'événements extrêmes en lien avec les sources et les flux de contaminants. Sur ces observatoires les questions de représentativité spatiale et temporelle devront être posées pour aussi permettre d'alimenter nos questionnements sur ces sujets (cf. chapitres « Observons les observatoires » p. 96 et « Intégration des différentes échelles d'espace et de temps dans l'étude des SIC » p. 48).

### Automatisation des prélèvements et des mesures pour caractériser l'éco-exposome

Fort de nos expertises, il est essentiel de réfléchir activement au choix de proxys pertinents pour évaluer les contaminations ou pollutions (e.g. des contaminants chimiques aux dynamiques écologiques variées, des contaminants biologiques, ou encore de l'ADNe), ainsi qu'à des paramètres abiotiques intégrateurs de ces contaminations chimiques, qui pourraient être suivis à haute fréquence sur le long terme. Cependant, d'importants obstacles analytiques et méthodologiques persistent dans le prélèvement et l'analyse des contaminants à haute fréquence (capteurs et analyseurs low-cost), notamment en raison du niveau élevé de sophistication requis pour les instruments de laboratoire (précision et qualité de mesure), qui s'avère peu compatible avec les contraintes du terrain et de l'échantillonnage (protocoles, stratégies, représentativité, conservation des échantillons).

Ces difficultés sont particulièrement cruciales lorsqu'il s'agit de la spéciation ou de la détermination des produits de transformation des contaminants. Des innovations pourraient émerger avec le développement de capteurs peu coûteux ou d'un « réseau de capteurs hétérogènes » (en collaboration avec CNRS Ingénierie, TERRA FORMA ; cf. chapitre « Responsabilité environnementale de la recherche en SIC » p. 122), ainsi que grâce à l'utilisation d'échantillonneurs passifs, de biocapteurs, de bioindicateurs de pollution, ou encore à la création de RiverLabs. Les défis techniques liés à l'adaptation de ces technologies sur le terrain restent toutefois fondamentaux, car les capteurs chimiques de haute qualité développés en laboratoire sont confrontés, sur le terrain, à des problématiques telles que les interférences et le biofouling, qui nuisent à leur performance et à la qualité des mesures.

### Bancarisation des échantillons

Il est également crucial de poursuivre le développement

de systèmes de conservation, de stockage et de banques d'échantillons (e.g. dans le cadre du PEPR OneWater, de l'IR RéGEF, ou en lien avec l'aquathèque (PC5 de OneWater) et la cybercarothèque). Cela permettra de mieux caractériser l'état initial ou l'évolution de la contamination d'un milieu grâce aux futurs outils analytiques. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de mener des études approfondies sur les protocoles de conservation, qu'il s'agisse de l'état chimique (e.g. pour les composés métastables) ou de l'état physique des échantillons (comme l'agrégation des nanoparticules).

Enfin, afin d'améliorer l'intégration entre l'observation et la modélisation, la création et l'alimentation de bases de données interopérables sont essentielles. Ces bases de données permettront de rendre les informations accessibles et exploitables par différents systèmes et outils, facilitant ainsi l'analyse et la modélisation des contaminations environnementales.

### Expérimentation et analyse

Des avancées sont en cours dans l'analyse du comportement et du devenir des contaminants, ainsi que de leurs phases porteuses (telles que les particules et colloïdes), au sein de systèmes biogéochimiques, couvrant des échelles allant de l'atomique/moléculaire jusqu'au mètre. Ces progrès reposent sur le développement de nouvelles méthodologies, dispositifs expérimentaux et combinaisons innovantes de techniques, incluant notamment des spectroscopies (e.g. XANES et EXAFS bulk), des spectrométries et des techniques d'imagerie telles que la spectro-microscopie synchrotron, Nano-SIMS, nano-FTIR, STEM, (nano)tomographie X, ainsi que des dispositifs micro- et milli-fluidiques, micro- et mésocosmes. Bien que ces technologies existent depuis un certain temps, les méthodes et les instruments qui les accompagnent continuent d'évoluer rapidement.

Les principaux enjeux résident dans cette évolution technologique continue, l'innovation dans le couplage des méthodes, et surtout l'ouverture de ces techniques à la communauté scientifique, afin de les appliquer à de nouvelles questions, dans des disciplines spécifiques, et à des matrices variées. Dans certains cas, le couplage de ces méthodes avec des approches isotopiques et des techniques de datation pourrait aider à situer les processus moléculaires dans le contexte des évolutions à long terme des systèmes, un domaine encore peu exploré.

Il est également crucial de développer de nouvelles approches expérimentales qui associent des expériences *in situ* (sur le terrain), des mésocosmes, des systèmes très simplifiés en laboratoire, et des modèles numériques, le tout coconstruit par des experts issus de diverses disciplines. Par ailleurs, des outils statistiques pourraient être développés pour optimiser la conception des expériences en laboratoire, ainsi que des procédures permettant de passer de l'échelle moléculaire à l'échelle macroscopique. Ce dernier aspect implique une collaboration accrue avec les communautés scientifiques spécialisées dans les procédures d'homogénéisation, afin

de garantir une cohérence dans l'analyse à différentes échelles.

Enfin, de nouvelles idées d'instrumentations et de modélisation pourraient soit s'inspirer de ce qui est fait dans les autres communautés, et appliquées/adaptées aux SIC, soit dériver d'outils existants pour en améliorer les limites de détection ou le spectre des contaminants analysés. Par exemple :

- Certaines techniques, « classiques » pour d'autres domaines, sont largement sous-exploitées en SIC (e.g. RMN, RPE, Diffusion de neutrons, Raman).
- Nouvelles méthodologies et traitement de données pour optimiser l'utilisation des outils existants (e.g. spectroscopies UV-vis, infrarouge, RPE spin-trapping, XAS, approches chimiométriques, etc.).
- Nouvelles techniques synchrotron (e.g. HERFD-XANES, XRS, RIXS, X-FEL nano-picoseconde, etc.) pour sonder la spéciation ou les dynamiques réactionnelles.
- Analyses non-ciblées des contaminants (e.g. non-target screening, approches 'Orbitrap' et TOF, etc.).
- Analyse et marquage isotopique pour l'étude des sources, de la spéciation et de la transformation des contaminants dans les compartiments environnementaux.
- Outils de modélisation numérique aux échelles moléculaires et nanométriques afin de comprendre le fonctionnement des interfaces solide-solution-contaminants. Cela englobe des techniques telles que la DFT (Théorie de la Fonctionnelle de la Densité), la dynamique moléculaire, la chimie quantique, et l'électrocinétique.

L'INSU dispose d'un puissant parc analytique, en cours de structuration notamment grâce à la mise en place et à la montée en puissance de l'IR RéGEF. Toutefois, en parallèle des besoins de développements analytiques, il subsiste d'importants verrous à lever concernant la préparation des échantillons variés (e.g. eaux, sols, minéraux, échantillons biologiques homogènes ou hétérogènes, etc.). Ces défis nécessitent le développement d'analyses spécifiques, ce qui limite l'accès de la communauté à des analyses de routine, comme cela pourrait être envisagé dans le cadre de RéGEF. Par exemple, il est nécessaire de disposer d'équipements adaptés pour garantir l'intégrité des échantillons naturels sensibles, en particulier sous les faisceaux des synchrotrons de nouvelle génération, afin de permettre l'utilisation optimale de ces techniques dans des contextes variés et pertinents pour la communauté.

## Modélisation

L'un des défis majeurs pour la prédiction du devenir, des transferts et des impacts des contaminants sera de développer une modélisation intégrée multidisciplinaire pour l'évaluation des risques environnementaux et de la vulnérabilité des socio-écosystèmes, à différentes échelles: de la molécule (ou du gène) à l'individu et la population, dans les différents compartiments de la Zone Critique, y compris à leurs interfaces, à différentes échelles de temps et d'espace. L'une des forces de la modélisation est de pouvoir aborder

une large gamme d'échelles spatio-temporelles, une approche particulièrement importante dans le cadre des contaminants. Cependant, d'importants verrous subsistent aux interfaces entre les échelles. Par exemple, i) La modélisation moléculaire doit évoluer vers une augmentation de la complexité des systèmes modélisés et la prise en compte de leur évolution (complexité chimique, interfaces solide-liquide et leur réactivité, systèmes désordonnés, rôle des modélisations à mésoéchelle, dynamique Brownienne, Boltzmann sur réseau, etc.), ii) les modèles de transfert à l'échelle du pore vers le bassin versant, iii) les modèles écotoxicologiques vers le réseau trophique et la santé des écosystèmes.

Comment identifier les points de bascule, en lien avec l'exposition aux contaminants, dans la réponse des organismes ou dans le fonctionnement des écosystèmes et comment les intégrer dans des modèles de prédictions pour obtenir des trajectoires? Le développement de modèles spatialement explicites en écotoxicologie, liant toxicocinétique et toxicodynamique, demeure un front de science. Comment intégrer, par exemple, i) la physiologie et l'adaptation à différents niveaux d'organisation dans les modèles et ii) la spéciation et les produits de dégradation issus de la transformation abiotique (photolyse, hydrolyse, réactions radicalaires) ou biotique (métabolites)?

Il est également nécessaire de réfléchir au développement de nouveaux outils de modélisation du transport réactif des contaminants, incluant la spéciation des contaminants et la formation (cinétiquement contrainte) de produits de dégradation, la spéciation redox des éléments trace métalliques ou encore le lien entre spéciation-biodisponibilité-toxicité (type BLM « Biotic Ligand Model » amélioré). Ce développement s'appuiera sur des collaborations efficaces, nécessitant souvent une coconstruction des projets, multi- et inter-disciplinaires, entre les observatoires (produisant des données pour tester et valider les modèles), les expérimentateurs (données pour calibrer et tester les modèles), les mathématiciens (développer les formalismes et des modèles numériques) et les informaticiens (développement des logiciels et interfaces). Ces modèles pourraient être basés sur des approches mécanistiques, statistiques (notamment big data et IA) ou leur combinaison.

Concernant le risque microbiologique pour l'être humain, l'animal ou le végétal, la modélisation de la dissémination spatiale d'agents pathogènes ou de gènes d'intérêt en santé publique (de virulence ou de résistance) est aujourd'hui confrontée à des verrous majeurs: quels sont les réservoirs environnementaux? Quel est le rôle du résistome ou du pangéome environnemental dans l'acquisition ou la dissémination de facteurs de virulence? Quelles sont les niches écologiques favorables à cette dissémination, y compris les microbiotes de la faune sauvage? *A contrario*, quels sont les environnements favorables à l'atténuation de ce risque? Quel est l'impact du dérèglement climatique sur ces dynamiques? De même, face à l'augmentation des épisodes d'efflorescences algales ou bactériennes productrices de

toxines (phycotoxines, cyanotoxines), par exemple, une modélisation du risque est confrontée à un manque de connaissance sur le déterminisme de la production des phycotoxines et cyanotoxines.

## Pollutions, société et inter-/trans-disciplinarité

### Comment améliorer les interactions entre communauté SIC et société pour l'étude des contaminants ?

Il est essentiel de renforcer la position de la communauté SIC en encourageant un recours plus systématique au corpus de connaissances scientifiques pour éclairer les décisions politiques, en particulier sur les questions liées à la pollution et aux contaminants environnementaux. Pour la communauté SIC, cela implique de revendiquer et d'assumer pleinement un rôle d'expertise, avant que ce rôle ne soit affaibli par des fake news, des théories complotistes ou d'autres formes de désinformation.

Il devient donc nécessaire de formaliser et de centraliser des canaux de communication privilégiés entre la communauté SIC et la société, afin que celle-ci puisse facilement solliciter les experts et, réciproquement, permettre à la communauté scientifique de répondre aux interrogations et attentes sociétales. Par ailleurs, la communauté SIC doit affirmer son besoin de sortir du cadre des commandes prédéfinies et obtenir les ressources nécessaires pour explorer de nouveaux questionnements et paradigmes. Cela inclut une approche proactive, telle que la réduction des polluants à la source, tout en investissant dans la recherche interdisciplinaire et transdisciplinaire.

Il est également crucial que la société facilite l'accès, sous certaines conditions de confidentialité si nécessaire, à l'ensemble des données publiques ou industrielles relatives aux caractéristiques des sources de pollution, des produits contenant des contaminants, des nouvelles molécules mises sur le marché, ainsi que leur devenir dans l'environnement et leurs effets sur le vivant. Un tel accès permettrait d'identifier plus précocement les risques potentiels et d'orienter efficacement la recherche en conséquence.

### Interdisciplinarité

Une coconstruction plus systématique des projets de la communauté SIC sur les pollutions et contaminations avec les SHS permettrait d'intégrer encore davantage des aspects essentiels en lien avec les choix de sociétés et l'évolution du droit de l'environnement. Sont en particulier concernées les réglementations liées à la formulation de nouvelles substances, à leur mise sur le marché et à leur cycle de vie, mais aussi la résolution des conséquences environnementales des pollutions ponctuelles ou diffuses en lien avec la réhabilitation, les préjudices et la justice sociale et environnementale. Parmi les aspects à intégrer, on peut citer :

- **La réflexivité** : Élaborer un cadre interdisciplinaire

réflexif pour l'étude des contaminations et des concepts liés aux pollutions, tels que l'émergence, l'impact, la remédiation, le préjudice humain et non-humain.

- **La compréhension des valeurs, des jeux d'acteurs et du comportement humain** : Mieux comprendre les principes et les fondements sociaux, politiques, culturels et économiques sous-tendant l'élaboration, la production, la distribution, la diffusion et l'utilisation de substances polluantes.
- **Le contexte culturel ou régional** : Prendre en compte les différences sociales, économiques et culturelles, ainsi que les contextes (écologique, juridique, gouvernance) locaux dans la compréhension du problème et dans la conception de mesures de gestion environnementale. En particulier l'intégration du vivant non-humain dans les prises de décision, le droit et les modes de gouvernance des contaminations environnementales constituent des verrous.
- **L'acceptabilité sociale** : Prendre en compte les perceptions, les valeurs et les préoccupations de la population.

Au-delà des interfaces interdisciplinaires identifiées ici, bien d'autres seraient pertinentes, incluant l'économie de l'environnement, la géographie sociale, etc.

### Transdisciplinarité

Il s'agit de repenser la façon d'interagir et de coconstruire des projets de recherche en mettant en jeu des liens avec des dynamiques citoyennes et les acteurs socio-économiques, notamment en favorisant l'émergence de questions de recherche coconstruites et en mettant en œuvre des structures et des communautés épistémiques autour d'enjeux sociétaux communs sur les contaminants, qui pourrait conduire à la désacralisation de la recherche et à son appropriation par le grand public :

- **Éducation et sensibilisation** : besoin de développer des programmes éducatifs de prévention et sensibilisation propres aux caractéristiques des territoires.
- **Participation citoyenne** : favoriser l'intégration des savoirs non académiques et des citoyens dans l'élaboration et le suivi de recherches autour d'un enjeu de contamination (science participative). Il s'agit en particulier d'analyser le lien et les temporalités entre les observations pour nourrir l'analyse des conséquences, l'alerte, les décisions, la gestion et la gouvernance, pour définir des schémas participatifs de gestion des problématiques environnementales.

# Forces et opportunités

- Les avancées méthodologiques et analytiques sur le développement d'approches d'analyse non-ciblée et de détection de niveaux traces dans des matrices complexes sont diverses : criblage sans *a priori* de contaminants, quantification de contaminants en traces, détection des contaminants en matrice complexe, spéciation, interactions aux petites-échelles, omiques et méta-omiques, etc. Ces avancées ouvrent de nombreuses perspectives pour acquérir de nouvelles connaissances et lever des verrous liés aux co-expositions, aux stressseurs multiples, etc. En ce qui concerne l'étude des réponses du vivant aux pollutions, ces avancées devraient également mettre en évidence les liens entre les effets observés aux différents niveaux d'organisation biologique ou ceux induits par les « effets cocktails ».

- Le programme EC2CO ainsi que de nombreux appels à projets de la MITI dédiés ou en lien avec les contaminants permettent de faire d'importantes avancées dans le domaine des contaminations environnementales. Ces différents appels à projets, et en particulier le programme EC2CO, ont également eu un rôle structurant très fort pour la communauté dont les membres ont ainsi appris à se connaître, à partager un langage et des projets communs et à collaborer efficacement.

- L'ouverture progressive de la communauté aux travaux sur les pollutions non seulement chimiques, métalliques et organiques, mais aussi physiques et biologiques permet de développer des recherches de plus en plus intégrées et de faire progresser l'étude des impacts des stressseurs multiples.

- L'avènement des solutions basées sur la nature et les nombreuses innovations pour la gestion des risques et la réhabilitation des sites et sols pollués enrichissent les questions scientifiques et les interactions avec les acteurs du monde socio-économique. Cet avènement s'appuie sur de nouveaux « laboratoires de terrain » pour étudier les trajectoires et l'impact des contaminations dans la Zone Critique.

- Si notre communauté réunit des expertises reconnues pour éclairer les instances décisionnelles, ces expertises restent le plus souvent laboratoire/chercheurs dépendant, par manque de visibilité de la communauté dans sa globalité. Des initiatives telles que la création de la Mission pour l'Expertise Scientifique au CNRS pourront permettre de pallier cet écueil. Il est nécessaire de mieux identifier et faire connaître l'expertise du domaine SIC pour appréhender la dynamique des contaminants microbiologiques et chimiques dans l'environnement.

- Le thème « contaminants » est transverse dans de nombreux réseaux nationaux/internationaux ou structures (locales/régionales) comme, par exemple, l'IR RéGEF, plusieurs groupements de recherche et réseaux thématiques, réseaux, avec un risque de dilution de la communauté. Néanmoins, la communauté SIC





L'exploitation de gisements métallifères de type porphyres entraîne l'exposition à l'air et l'oxydation des sulfures métallifères de ces roches. Il en résulte, sur le long terme, une forte acidification des eaux (« drainage minier acide») et la présence de concentrations élevées en métaux de ces eaux. Le projet sur l'impact environnemental de l'exploitation du porphyre cuprifère de la Mine Lombong Mamut (Sabah, Malaisie) visait à déterminer le transfert de ces contaminants métalliques en aval de cette exploitation abandonnée et le risque sanitaire associé. Certains des écosystèmes impactés sont en effet utilisés à des fins agricoles pour la production de riz. Ce projet a été soutenu par le GdR TransMet.  
© Martine LANSON / ISTERre



« contaminants » est rapidement capable de mobiliser des équipes ou réseaux de collaboration pour répondre à des problématiques d'actualité (e.g. plastiques, PFAS, pesticides, antibio-résistance, etc.), ce qui montre une excellente connexion entre les équipes, à laquelle aura certainement contribué le programme EC2CO.

- La structuration de plus en plus efficiente des suivis et observations (e.g. dispositifs et services INSU et CNRS Écologie & Environnement, intégration des différents dispositifs) favorise les synergies et la mise en commun des sites pour le couplage des observations et des moyens sans ajouter de nouvelles structures administratives.

## Recommandations

### Besoins communs et plateformes

Des besoins émergent concernant l'analyse *in situ* et non ciblée des contaminants, notamment pour évaluer l'éco-exposome et assurer une surveillance efficace des écosystèmes. Cela inclut le déploiement de capteurs et d'échantillonneurs passifs, ainsi que d'outils à faible coût pouvant être déployés sur de nombreux sites. Ces besoins impliquent également la réalisation d'analyses chimiques, biochimiques et biologiques, par exemple *via* des plateformes analytiques mutualisées, spécialisées dans l'analyse des micropolluants ou dans les approches méta-omiques et la bio-informatique associée.

Pour ouvrir ces plateformes à un plus grand nombre d'utilisateurs, en particulier aux observatoires, et permettre ainsi la réalisation d'un grand nombre d'analyses à haute fréquence et haute résolution, il est nécessaire de poursuivre le développement de nouvelles méthodes pour l'analyse des contaminants et de leurs effets. Cela nécessitera le recrutement de personnel technique qualifié (e.g. en chimie analytique, en biologie moléculaire ou bio-informatique), ainsi que l'acquisition d'équipements permettant l'automatisation de la collecte des données. L'augmentation significative du volume de données produites imposera également un effort substantiel pour la bancarisation de ces données, afin d'optimiser leur utilisation et leur valorisation ainsi que leur analyse et leur interprétation.

Pour soutenir les recherches sur les « effets cocktails » et les stressés multiples, la mise en place de démarches de normalisation des tests d'écotoxicité et des expérimentations communes à grande échelle, ainsi que la création d'unités de service (UAR) dédiées à l'analyse et à l'expérimentation, constitueraient des outils puissants. Ces dispositifs permettraient de pallier la difficulté de tester toutes les combinaisons possibles de contaminants en recueillant des résultats parallèles et interopérables, notamment *via* des expérimentations en parallèle comme dans les procédures de tests inter-laboratoires (« ring tests »).

Afin de faciliter l'accès au synchrotron à un plus grand nombre d'utilisateurs, il pourrait être envisagé de demander des créneaux de faisceau partagés sur certaines lignes de lumière, *via* des groupes d'allocation de blocs (« Block Allocation Group »).

Enfin, pour lever les obstacles à la prédiction des transferts de contaminants et de leurs effets à différentes échelles, et pour valoriser les données issues de nos observatoires, des plateformes dédiées à la modélisation avec du personnel spécialisé seraient des outils essentiels. Ces plateformes permettraient de soutenir les développements méthodologiques communs et d'améliorer l'intégration et la valorisation des données acquises.

### Structuration et organisation

Pour renforcer la structuration et les efforts communs au sein de la communauté SIC, il semble pertinent de pérenniser les réseaux déjà existants, par exemple en écotoxicologie microbienne, sur les plastiques ou les PFAS, et de créer de nouveaux réseaux thématiques ou groupes de travail. Des réseaux dédiés à l'éco-exposome (définition, caractérisation et priorités scientifiques), à la bancarisation d'échantillons (enjeux et méthodes) ou à la modélisation en lien avec les contaminants (spéciation géochimique, écotoxicité, transport réactif) favoriseraient les interactions au sein de la communauté SIC, et permettraient de coconstruire des projets de recherche plus efficacement. Ces initiatives non seulement catalyseraient la recherche et le développement de modèles, mais elles amélioreraient également la mutualisation des ressources et renforceraient la visibilité des travaux. De plus, elles offriraient de nouvelles opportunités de formation pour le personnel et les étudiants sur des thématiques transversales ou émergentes.

Il est également crucial de promouvoir le dialogue entre modélisateurs, observateurs et expérimentateurs. Pour approfondir notre compréhension des impacts des contaminants, la communauté SIC devrait élargir ses compétences en intégrant, par exemple, les sciences de l'évolution (e.g. technologique, biologique, anthropologique). Concernant la gestion et la remédiation des pollutions, une meilleure structuration des communautés incluant le génie des procédés, l'éco-conception et d'autres disciplines connexes, ainsi que les SHS, permettrait de travailler de manière cohérente sur les différents leviers, depuis les sources de pollution jusqu'à la remédiation des impacts.

En ce qui concerne l'approche « One Health », une

coordination des actions à l'échelle nationale est nécessaire pour éviter les redondances et encourager les études complémentaires. Ces actions devraient s'appuyer sur l'expertise des laboratoires, des plateformes analytiques et des sites d'observation. Associer les acteurs du secteur de la santé, notamment les toxicologues et les épidémiologistes à l'échelle des « territoires d'observation », ainsi que les associations de patients, représenterait un atout considérable.

De manière générale, il est essentiel de poursuivre nos efforts d'observation et d'organisation des suivis environnementaux en consolidant ou en renforçant les dispositifs expérimentaux de terrain et les stations expérimentales, afin de suivre les écosystèmes intégrés dans les réseaux nationaux et internationaux. Sur la thématique des pollutions, cela pourrait inclure le développement d'observatoires : i) dans des territoires pollués en transition, incluant les dimensions sociales et sanitaires ; ii) dans des milieux d'interface tels que les zones ripariennes, les bassins de drainage ou les interfaces nappe-rivière, ainsi que dans le continuum terre-eau. Des réflexions sur le maillage territorial des observations doivent être menées, et il est important que la communauté vise à intégrer systématiquement la mesure des contaminations dans les dispositifs d'observation (en automatisant et reliant ces mesures à la biodiversité et aux fonctions des écosystèmes).

Pour atteindre ces objectifs ambitieux, un soutien significatif en ressources humaines est nécessaire pour garantir la conduite et la pérennisation des suivis à long terme, en particulier sur les pollutions environnementales et leurs conséquences sur le vivant (notamment dans les observatoires, zones ateliers, laboratoires mixtes internationaux (LMI), observatoires hommes-milieus (OHM), Living Labs et suivis à long terme de la biodiversité).

Enfin, l'amélioration de l'accessibilité et de la valorisation des données produites, par exemple en rendant l'affichage et l'information des catalogues spatialisés plus efficaces, ainsi que des simulations de référence est cruciale. Cela nécessite d'organiser de manière rationnelle la collecte, le stockage et la bancarisation des échantillons, en synergie avec d'autres agences (ADEME, ANSES, BRGM, Andra), instituts (Ifremer, INRAe, INERIS, IRSN, CEA) et organismes nationaux.

Finalement, la création d'une « Cellule Contaminants et Pollutions » au CNRS est une priorité car elle permettrait : i) d'identifier et de valoriser la recherche sur les contaminants au sein du CNRS, ii) d'identifier des personnes référentes pour chaque type de contaminant et contexte de pollution spécifique, ainsi que des juristes experts des réglementations environnementales formés à la communication, et iii) d'analyser les opportunités de projets et de les promouvoir aux niveaux européen et international.

## Références

- Oleson K., Falinski K., Audas D.-M., Coccia-Schillo S., Groves P., Teneva L., Pittman S., 2018. Chapter11: *Linking Landscape and Seascape Conditions: Science, Tools and Management*. pp. 319–364.
- Sala S. & Goralczyk M., 2013. *Chemical footprint: A methodological framework for bridging life cycle assessment and planetary boundaries for chemical pollution*. *Life Cycle & Sustainability*, 623-632. <https://doi.org/10.1002/ieam.1471>

# Zone critique urbaine et péri-urbaine



# Les enjeux

Aujourd'hui, 55 % de la population mondiale vit en ville et cette tendance va se poursuivre avec une projection à 2050 où pratiquement sept personnes sur dix vivront en milieu urbain.

Les milieux urbains concentrent l'ensemble des enjeux propres aux SIC mais sont également partagés avec d'autres domaines de l'INSU (OA) et d'autres instituts du CNRS, notamment CNRS Écologie & Environnement, CNRS Ingénierie, en référence à la technosphère (réseaux sous-terrains, surfaces imperméables, bâti, etc.), CNRS Sciences humaines et Sociales (pour les enjeux avec la société civile, la densité de population, les politiques publiques, les aménagements, etc.) et CNRS Physique (physique urbaine). Ces recherches mobilisent aussi d'autres établissements (CEREMA, INRAe, IRD, etc.) et engagent d'autres acteurs comme les collectivités, les opérateurs, les citoyens, la société civile en général. Les socio-écosystèmes urbains sont très hétérogènes et soumis à des trajectoires temporelles complexes. Matières et matériaux y sont diversifiés, d'origine majoritairement anthropique (d'où le terme « astysphère » proposé par Norra, 2009) et très concentrés du fait d'un usage intense des ressources et de la génération de déchets. Les flux et les impacts de ces déchets représentent des enjeux sociétaux forts, à la fois en termes de ressources et de risques. Certains milieux urbains présentent même une sensibilité accrue aux forçages anthropiques : villes côtières (dont celles construites en lien avec les mangroves), villes du Sud à forte densité et croissance démographique. Ils sont, par ailleurs, en interaction avec les milieux environnants (périurbain, rural, hydrosystèmes), et considérés, par exemple, comme source d'émission de contaminants vers ces milieux, mais aussi plus généralement comme des lieux d'échanges de matières et d'énergie avec ceux-ci.

La ville est une entité politique et technique, organisée socialement. L'approche holistique de « Zone Critique urbaine » est la plus adaptée pour déployer à l'échelle de la ville les solutions existantes et à concevoir pour faire face aux conséquences des changements globaux. Toutefois, les méthodologies reposent sur le choix des échelles pertinentes pour décrire les processus (e.g. bâti, site, ouvrage, quartier, bassin versant, etc.) et sont généralement dépendantes du manque de connaissances aux différentes échelles. Depuis une quinzaine d'années, les ponts entre champs disciplinaires se mettent en place, avec des consortiums qui s'organisent de façon pluri ou interdisciplinaire.

La communauté SIC manque sans doute d'outils pour réfléchir à la future ville idéale, le tropisme étant d'imaginer la ville de demain avec les idées d'aujourd'hui. Mais voici tout de même comment la communauté imagine, en 2024, cette ville de demain. La ville est soit destinée à disparaître, soit à prendre une dimension plus humaine, selon des espaces intégrés dans une trame

urbaine rationalisée ou non. Les villes seront plus vertes, plus connectées et en harmonie avec la nature (sols, eaux, biodiversité...), très sensorielles, mais conserveront une structure minérale, qui s'appuiera sur un patrimoine existant qualitatif, mais aussi sur des matériaux innovants et durables pour les nouvelles constructions ou pour la rénovation. Il s'agira de villes « dessus-dessous » avec un sous-sol mieux exploité, en particulier pour s'adapter aux vagues de chaleur ou aux épisodes froids. Elles seront sobres en ressources, tendront vers l'autosuffisance par le truchement d'un métabolisme circulaire (e.g. agriculture urbaine) et d'une approche territoriale amplifiant les connexions avec le péri-urbain et le rural. Les villes seront durables, résilientes, agiles, adaptatives (face aux événements extrêmes) et réparables. Elles feront la part belle aux mobilités douces dans une ambition globale de sécurité et d'apaisement. Elles permettront d'être en bonne santé, garantiront une bonne qualité de vie et seront, à ce titre, dépolluées. Seront-elles connectées, ultra-informées, dans l'esprit des démarches Smart-City ? Le débat n'a pas été tranché. En revanche les villes du futur seront forcément inclusives, participatives, avec les citoyens au cœur des décisions. Pour cela il faudra redéployer des initiatives d'éducation populaire, repenser la gouvernance (planification vs. agilité) et travailler moins pour participer plus. Pour imaginer pleinement la ville du futur, sans doute faudrait-il, comme cela a été souligné dans plusieurs ateliers, impliquer les sciences humaines et sociales, l'art et la culture pour associer l'imagination aux réflexions de la communauté SIC.

Les réponses à ce défi se traduisent par l'affichage d'une série de questions scientifiques concernant les différentes composantes de l'environnement urbain, soit spécifiques à une composante, soit transverses pour aller vers une mise en œuvre d'actions à l'échelle d'un quartier, d'une ville, voire d'un territoire. Les propositions prospectives et la capacité à imaginer des « pas de côté », exprimées lors des travaux des journées de prospective, sont ensuite valorisées en tant que forces et opportunités, et traduites en recommandations.

# Les questions scientifiques

## Entre technosphère et écosystème, la ville de demain est à penser en 3D

Les aménagements urbains et les formes urbaines ont indéniablement une influence forte sur l'ensemble de l'écosystème urbain. Le bâti, les infrastructures routières et l'ensemble des aménagements scellant les sols ou modifiant les cours d'eau influent massivement sur le cycle de l'eau de surface, perturbant les écoulements naturels, l'infiltration des eaux et l'évapotranspiration. Les flux d'eau et d'énergie sont associés en ce qui concerne la problématique des îlots de chaleur urbains et ne font sens que si on les considère en interaction avec le bâti. Les réseaux et les structures souterraines modifient quant à eux le cycle de l'eau souterraine. Aussi, une question prégnante dans les milieux urbains, sans doute exacerbée par rapport à d'autres milieux, est le **rapport entre la structure physique du milieu urbain et son rôle dans les transferts de matière et d'énergie**. Du sous-sol, objet de multiples « anthroturbations » (carrières, égouts, remblais, sous-sols, parkings, métro, Zalasiewicz *et al.*, 2014), au sommet des bâtiments, les recherches devront pouvoir s'appuyer sur des modèles physiques et numériques 3D à haute résolution afin de modéliser et comprendre la dynamique et les flux de matière et d'énergie en milieu urbain.

Sols et sous-sols apparaissent au centre du système urbain. Leur prise en considération prend de l'ampleur, notamment au regard de la réglementation sur l'artificialisation des sols. Certains sols des milieux urbains, éventuellement qualifiés de technosols ou d'anthrosols selon les sites considérés et le niveau d'action humaine, sont constitués par exemple de matériaux de remblais d'origine anthropique, mélanges de granulats de carrières, de terres excavées ou encore de matériaux potentiellement sous-cyclés à partir de matériaux de construction récupérés après usage. De ce fait, ces sols ne présentent pas les mêmes caractéristiques biogéochimiques que les sols naturels, même si des travaux récents en génie pédologique tendent à montrer qu'une pédogénèse précoce peut se mettre en place dans le contexte de la reconstruction de sols (Séré *et al.*, 2010). **Comment caractériser leurs fonctions à différentes échelles (projet, quartier, ville) pour optimiser leur usage ?** Le développement croissant des espaces urbains entraîne aussi des travaux mobilisant l'excavation de quantités importantes de sols et de sédiments. La gestion hors site de ces terres potentiellement contaminées est régie par des guides validés au niveau ministériel (MTES, 2020). Mais des valorisations sur site plus systématiques seraient assurément moins coûteuses en énergie et en ressources. La réutilisation en remblai ou comme composant de nouveaux matériaux dans les filières des travaux publics en sont des exemples. Le domaine émergent du génie pédologique s'intéresse à

la pédogénèse de ces technosols et à leur capacité à permettre le développement du vivant. Par ailleurs, un enjeu majeur est la capacité de ces sols à stocker du carbone sur le long terme dans un contexte d'adaptation au changement climatique. Les sols construits offrent donc une perspective d'étude particulièrement pertinente visant à une compréhension plus fine des processus pédogénétiques. Cependant, la temporalité de ces processus et la pérennité des services écosystémiques que peuvent rendre ces sols construits restent des questions ouvertes.

## Des villes plus vertes et en harmonie avec la nature : le défi du passage à l'échelle du continuum « sol-eau-végétation-bâtiment-atmosphère »

De nombreux bénéfices sont attribués à la nature en ville pour les habitants, leur santé physique et psychique, et comme support de biodiversité. La « nature en ville » est un concept polysémique, sur lequel de nombreux spécialistes apportent des éclairages disciplinaires, par exemple en philosophie (Younès, 2008) ou en écologie urbaine (Snep & Clergeau, 2012). Toutefois, l'usage de ce concept permet d'avoir une approche englobante des éléments « naturels » (abiotiques et biotiques) des espaces urbains (sol, eau, végétation, faune, atmosphère, etc.) en contact avec la technosphère et d'aller vers l'échelle du bassin versant ou de la zone d'apport.

Une meilleure connaissance de ces « contacts » nécessite l'étude des interactions aux interfaces, au sein du triptyque eau-sol-atmosphère, et en particulier de la dynamique des écoulements d'eau de surface (e.g. inondations) ou des aérosols et bioaérosols, et leurs impacts associés. D'autre part, pour répondre à l'enjeu de la réduction des îlots de chaleur urbain, ou celui de la diminution de l'empreinte carbone de la ville, ces éléments « naturels » sont repositionnés dans les expérimentations et les modèles en contact avec le bâti, pour mieux estimer les flux d'eau et d'énergie. Ainsi, la base de travail devient le continuum sol-eau-végétation-bâtiment-atmosphère, avec une approche multi-échelle (rue-région). Les voies de recherche portent sur **les couplages entre processus**. Par exemple, les questions de santé impliquent d'intégrer les processus micrométéorologiques et les processus physico-chimiques associés à la qualité de l'air. De même, l'évaluation de la végétalisation en milieu urbain nécessite de mieux qualifier ses bénéfices multi-échelles (micrométéorologique à climatologique), mais aussi ses inconvénients (e.g. émission de composés organiques volatils, etc.). De plus, dans un contexte de modifications des régimes de pluie et de température, le couplage



Ville de Grenoble vue du téléphérique de la Bastille. De par son enclavement au milieu des montagnes, la cuvette grenobloise est propice à l'accumulation de polluants lors des épisodes anticycloniques.

© Marc DESCLOITRES / IGE

avec les processus hydrologiques est une priorité pour comprendre comment les ressources en eau peuvent être mobilisées dans l'aménagement pour assurer un apport en eau régulé à une ville plus verte (e.g. transferts de l'eau dans les arbres). Enfin, l'une des finalités de la nature en ville est d'améliorer le bien-être et la santé des habitants et plus généralement du vivant en ville, auquel contribue le confort thermique. De nombreuses questions sont ouvertes en termes de métrologie et de méthodologie pour croiser les processus physiques et physiologiques, y compris de perception, afin de mieux caractériser les impacts sur la santé humaine.

## Caractérisation et dynamique des matières, cycles biogéochimiques urbains

Les spécificités des cycles biogéochimiques (cf. chapitre « Stocks & Ressources naturelles » p. 60) du milieu urbain impliquent une attention particulière. En effet, dans une telle structure 3D complexe, comprendre et quantifier les cycles de l'eau et les cycles biogéochimiques (C, N et P principalement) et leur dynamique restent un enjeu fort malgré les avancées des travaux sur le « métabolisme urbain ». Il s'agit d'identifier les sources, de quantifier les stocks et les flux, mais aussi de définir les hétérogénéités spatiales et les évolutions temporelles de ces variables.

## Les pollutions chimiques et biologiques : enjeux de connaissance des métabolites, d'exposition et d'impacts

Au-delà des cycles biogéochimiques généraux, une attention particulière doit être portée aux contaminants (e.g. biocides, particules minérales, métalliques et carbonées issues des activités humaines, antibiotiques, produits pharmaceutiques, drogues licites et illicites, produits de soin personnel et cosmétiques, résidus d'alimentation, produits industriels (dont les perfluorés), éléments trace métalliques (ETM) et métalloïdes, bioaérosols (pollens, microorganismes, débris et excréments d'animaux, de végétaux et de microorganismes), micro- et nanoparticules, plastiques et autres matériaux organiques anthropiques (particules de pneus), etc.). L'étude de la spéciation de ces contaminants jusqu'à l'échelle moléculaire permet de mettre à jour les ressorts mécanistiques de leurs transformations et de leur mobilité vers les milieux tels que les sols et les eaux dont le bon état écologique est une question critique. **Les formes chimiques identifiées comme spécifiques des milieux urbains peuvent en retour se révéler être de bons indicateurs pour suivre la zone d'emprise des contaminations exercées par la ville.**

La complexité de l'évaluation de la toxicité des contaminations multiples (e.g. effet cocktail, exposition



Les caniveaux parisiens abritent une grande diversité de micro-organismes. Des chercheurs ont étudié la biodiversité des caniveaux des rues qu'ils ont comparée à celle des sources d'eaux non potables. En analysant près d'une centaine d'échantillons distribués sur l'ensemble de Paris, ils ont trouvé 6 900 espèces potentielles d'eucaryotes. Cette biodiversité foisonnante est majoritairement composée de microalgues du groupe des diatomées, ainsi que d'autres eucaryotes unicellulaires comme des amibes, des alvéolés ou des rhizariens mais aussi des champignons, des éponges et des mollusques.

Les chercheurs émettent l'hypothèse que ces communautés biologiques complexes pourraient être mises à profit pour traiter les eaux de pluie et les débris urbains en contribuant à la décomposition des déchets solides et d'autres types de polluants.

© Pascal Jean LOPEZ / BOREA / MNHN / IRD / UPMC / UNICAEN / UA / CNRS Images

récurrente, développement de biorésistance, etc.), ainsi que les moyens pour parvenir à apporter des réponses scientifiques en amont de la mise en place de normes environnementales sont abordés en détails dans le chapitre « Contaminants et pollutions », p. 72.

## Des trajectoires temporelles indicatrices pour maîtriser l'empreinte anthropique

L'étude des archives géologiques (e.g. sédiments, spéléothèmes, etc.) ou biologiques (e.g. cernes d'arbres, etc.) en milieu urbain est relativement récente. Elle permet, selon une démarche de rétro-observation, de retracer l'évolution temporelle du développement des espaces urbains, des fronts d'urbanisation et autres zones de transition, des activités qu'ils hébergent, de l'évolution des usages (dont usage des sols) et consommations, et de leurs impacts. Au-delà de la reconstruction de l'histoire urbaine récente, il s'agit d'identifier les seuils de résistance, de résilience et d'irréversibilité des altérations anthropiques auxquels les écosystèmes urbains sont soumis. Cela peut être notamment réalisé par le suivi i) de contaminants historiques dont les sources sont connues (e.g. le plomb ou les pesticides) dans les carottes et spéléothèmes, ii) de phases minérales spécifiques (e.g. dérivant des matériaux de constructions), ou encore iii) de contaminants émergents. Les défis consistent à trouver des zones non impactées pour bien définir les fonds géochimiques ou pour circonscrire les signatures chimiques de sources de pollution spécifiques (e.g. *via* les eaux de surface ou par voie atmosphérique).

Tout comme en milieu naturel, le décryptage des archives environnementales de l'histoire urbaine doit s'appuyer sur une compréhension fine des processus de construction de l'archive, impliquant, par exemple, l'étude de l'érosion, du transfert et du dépôt des particules porteuses de traceurs/contaminants dans une démarche « source-to-sink » classique en études paléoenvironnementales (INSU, 2024). La rétro-observation doit également s'appuyer sur une calibration robuste des indicateurs et proxies que les archives contiennent. Cette calibration implique de caractériser les sources et de comprendre la dynamique des matières, molécules, éléments qui, au final, s'accumulent dans les archives et dont la diversité reste sous-exploitée. Dans l'objectif de relier quantitativement les traceurs aux phénomènes dont ils témoignent, une attention particulière doit être portée à la dynamique des particules minérales et organiques (cf. paragraphe sur la dynamique des matières) qui constituent les briques élémentaires de ces archives, et leur fonction de phase porteuse des traceurs. La caractérisation fine et exhaustive des traceurs minéralogiques, géochimiques, isotopiques et biologiques (ADN, ARN, lipides, protéines, etc.) préservés dans ces archives offre un champ de recherche quasi infini. L'interprétation de ces archives doit aussi s'enrichir des travaux de la communauté SIC en milieu urbain. En particulier, les moyens d'observation déployés en milieu urbain pourraient avantageusement

être combinés à la rétro-observation et les trajectoires reconstituées confrontées aux chroniques issues des travaux des économistes, historiens, sociologues, etc..

Afin d'être assurés que les chroniques reconstituées sont comparables, l'analyse d'archives environnementales de l'histoire urbaine dépend de la disponibilité de moyens de datation pour l'établissement de modèles d'âges robustes. Considérant les échelles temporelles (quelques années à quelques dizaines d'années enregistrées) et leurs résolutions (quelques jours dans les cas les plus favorables), de nouveaux modes de datation sont à imaginer.

## Aléas et risques – La recherche au service de la prévention et de la maîtrise des risques amplifiés par les changements globaux

Le milieu urbain est soumis à des aléas d'origine naturelle et/ou anthropique. La densité de population ajoutée à la concentration des fonctions politiques et économiques rend le milieu urbain particulièrement vulnérable. La communauté SIC s'intéresse aux risques pour l'environnement (e.g. accident chimique touchant les compartiments eau, air et sol), aux mouvements de terrain et aux risques sanitaires. En cohérence avec le concept One Health, « une seule santé », c'est une **approche multirisque qui est à développer**. Le 4<sup>e</sup> Plan National Santé-environnement (MTE, 2021) soutient cette démarche par des études prenant en compte également l'aménagement urbain (« Urbanisme favorable à la santé »). Toutefois, au-delà des initiatives du type « Cours Oasis » (CAUE, 2020), l'approche multirisque reste un enjeu dans les environnements urbains et doit comporter, sans doute plus qu'ailleurs, une évaluation écotoxicologique des contaminations multiples (cf. chapitre « Contaminants & Pollutions » p. 72). Quelque soit le domaine, tant en santé environnementale qu'en énergie du bâtiment, le constat est fait d'un besoin de données urbaines multi-échelles.

## Ressources, valorisation et solutions

Une attention particulière doit être apportée au développement de matériaux et procédés innovants et durables, aux cycles et aux recyclages des matières de manière à, parfois, basculer un potentiel risque en opportunités. Pour les sols, le chantier majeur est celui de la remédiation des sols contaminés. Une meilleure compréhension des processus aux interfaces permettra d'améliorer les bioprocédés et les biotechnologies pour la dépollution des sols, avec une contribution importante espérée de la phytoremédiation. Plus spécifiquement, l'étude des réactions radicalaires permettra d'améliorer la dégradation des contaminants organiques dans les sols, les sédiments et les nappes. Les terres excavées

constituent également une ressource pour la création de nouveaux matériaux de construction, mais aussi pour imaginer de nouvelles modalités de stabilisation du carbone dans les technosols. L'eau constitue une ressource précieuse dans les milieux urbains. La communauté SIC doit porter un effort renouvelé à la fois sur les questions i) d'infiltration (e.g. concept de ville poreuse, dés-imperméabilisation, etc.) tout en maîtrisant les risques potentiels (e.g. remobilisation des polluants et contamination des sols et nappes, stabilité du sous-sol) et ii) de ré-utilisation des eaux urbaines en apportant une expertise sur les filières eaux usées/eaux pluviales et sur les méthodologies de séparation à la source et d'exploitation des nutriments (e.g. N, P, etc.). Plus largement, l'expertise de la communauté SIC pourra largement abonder les travaux sur le recyclage/ré-use des déchets urbains (e.g. boues de stations d'épuration, composts, etc.) dans une démarche d'économie circulaire et de solutions fondées sur la nature. Elle contribuera également à l'établissement d'indicateurs de qualité du traitement et des matières recyclées, en étroite collaboration avec les pouvoirs publics afin de modifier le cadre réglementaire.

## Empreintes et impacts du milieu urbain sur le péri-urbain et sur le territoire

Au-delà des aspects qualitatifs, il est également nécessaire de quantifier l'empreinte du milieu urbain sur les hydrosystèmes (eutrophisation, contamination des plans d'eau mais aussi des sédiments, nappes, etc.), sur la chimie atmosphérique (dont les flux de GES), sur le climat des alentours ou sur les écosystèmes côtiers, notamment dans le cas des mangroves. Plus généralement, il manque encore aux études urbaines des estimations fines, associant par exemple une dimension économique, sur les flux de matières entre le milieu urbain et les milieux/écosystèmes proches, qu'il s'agisse des milieux péri-urbains ou de systèmes plus distants.

# Forces et opportunités

## Maturité de la communauté « milieu urbain » : un SNO dédié au milieu urbain et des savoir-faire complémentaires à l'échelle nationale

La labellisation du service national d'observation des environnements urbains (SNO Observil) en 2020 par l'INSU a assurément été un accélérateur de la structuration, en cours, d'une communauté, jusqu'à constituée d'observatoires en hydrologie urbaine et de travaux sur la télédétection, la biogéochimie et la microclimatologie. La Zone Atelier Environnementale et Urbaine est aussi un dispositif de recherche transdisciplinaire qui a pour mission l'étude et la compréhension des enjeux environnementaux sur le territoire de l'agglomération Strasbourgeoise. Notons enfin que la Zone Atelier Armorique mène des recherches sur les relations entre dynamiques sociétales et dynamiques environnementales, le long de gradients allant de l'urbain au rural, avec le paysage comme objet d'articulation.

La bancarisation des données facilite le montage de projets d'envergure (ANR, PEPR, TOSCA, Europe...) autour du fonctionnement physique, biologique et géochimique des environnements urbains. Le PEPR d'accélération VDBI « Solutions pour la Ville Durable et le Bâtiment Innovant » a vocation à soutenir la recherche urbaine, en faisant porter l'effort sur les collectifs nationaux et des projets innovants tournés vers l'applicatif. La nouveauté de l'outil ne permet pas encore de juger de son efficacité mais les attendus du PEPR incitent fortement aux échanges entre communautés.

## Acquisition de données par observation et expérimentation : des opportunités à saisir

Les échantillons servent à caractériser l'état biophysico-chimique de l'environnement urbain. Mais ici, l'accès aux échantillons peut être rendu encore plus difficile que dans des contextes plus naturels du fait de considérations légales et des nombreux interlocuteurs. Les démarches engagées sur la curation des échantillons urbains pourraient être une opportunité pour lever des freins, à condition que leurs spécificités (e.g. propriété, réglementations selon les communautés impliquées) soient prises en compte de manière précoce.

Les travaux de recherche peuvent s'appuyer sur différentes techniques ou instrumentation récentes et innovantes. Les diagnostics de l'état des écosystèmes et de la santé des populations humaines peuvent bénéficier des avancées importantes en métagénomique

et séquençage haut débit. Cela ouvre des portes vers la recherche de nouveaux proxys (ADNe) et bioindicateurs. De plus, le développement des approches « omiques » peut continuer à être mis à profit pour établir une hiérarchie des pressions naturelles et anthropiques à partir du potentiel génétique des populations microbiennes.

Une veille institutionnalisée sur les évolutions de la métrologie est une piste à explorer pour accélérer la diffusion des meilleures techniques pour l'étude des processus urbains et pour l'aide à la décision (cf. chapitres « Observons les observatoires » p. 98 et « Données en SIC » p. 104). La transférabilité vers l'opérationnel sera l'un des enjeux des années à venir.

La télédétection offre, avec la précision des méthodes actuelles (e.g. LIDAR, mesures aéroportées et spatiales), des pistes d'amélioration de la résolution des Modèles Numériques de Terrain. On voit également émerger l'application de la géophysique à l'étude des transferts d'eau dans le sol et la végétation. La disponibilité de ces données devrait permettre des avancées franches sur la structure 3D complexe des mondes urbains, préalable essentiel à la modélisation des flux d'énergie et de matière.

Cette ambition ne pourra aboutir qu'à la condition que les propriétaires non-académiques de données complémentaires d'intérêt (e.g. opérateurs privés, collectivités, etc.) ouvrent leurs données. La densification des réseaux de mesure urbains via, par exemple, la participation citoyenne est une opportunité d'ores et déjà saisie dans différents projets.

De manière générale, l'espace urbain est l'objet de mesures réalisées par une grande diversité d'acteurs. L'évaluation de la fiabilité de ces mesures et leur intégration dans des systèmes partagés demeurent l'un des grands chantiers à venir sous peine d'éparpillement et de perte d'efficacité. La disponibilité de nombreuses données éparpillées et hétérogènes doit motiver des collaborations avec les sciences mathématiques, sciences de l'information et informatique pour la fouille et l'analyse de données (Big Data, IA, etc.). Par exemple, les communautés SIC devraient pouvoir accéder aux résultats des campagnes Paname 2022 et 2023 et aux bases de données épidémiologiques pour aborder les questions de multi-expositions et le suivi des impacts en lien avec l'évolution de la ville et de ses aménagements.

Enfin, l'effort expérimental doit être maintenu ou renforcé sur les objets du milieu urbain.

## Liens modèles/données

L'enjeu futur sera de combiner la diversité de ces données dans des modèles 3D intégrés et d'exploiter ces modèles haute résolution dans les exercices de modélisation.

Le milieu urbain est confronté aux enjeux d'imbrications, nécessitant des développements de méthodes de descente d'échelle en modélisation comme en observation (e.g. de la ville, au quartier, à la rue et aux bâtiments) pour rendre compte des hétérogénéités intra-urbaines et des couplages avec l'extérieur de la ville.

Pour parvenir à une description plus fine des processus

physiques et biogéochimiques, il sera nécessaire d'améliorer la paramétrisation des modèles de surfaces continentales en milieux urbains et de les coupler avec les modèles de chimie-transport. À terme, le couplage des modèles bio-physico-chimiques avec les modèles économiques et sociaux (pour intégrer les pratiques et usages) doit être fortement envisagé.

## Recommandations

### Organiser l'interdisciplinarité

Les silos disciplinaires restent un frein à l'identification de questions partagées et à une vision et résolution globales des enjeux. Au sein des SIC, les principales disciplines concernées sont la pédologie (et le génie pédologique), la physique des sols, l'écologie, la microbiologie, l'hydrologie, la géochimie, l'agronomie, la géologie, mais aussi bien plus largement, le génie civil, la biologie moléculaire, l'écotoxicologie, la psychologie environnementale, l'ingénierie environnementale, etc. Cette interdisciplinarité est nécessaire au développement, en cours, d'une véritable « écologie urbaine » voire d'une « urbanologie » à inventer. Pour aller plus loin, il est nécessaire d'impliquer des disciplines aussi diverses que la philosophie, l'anthropologie, la géographie, la sociologie, l'économie (dont économie écologique), les sciences politiques, les études littéraires et historiques (dont histoire environnementale), l'art, le design ou les sciences de la santé, pour connecter cette « urbanologie » aux « humanités environnementales ». Le domaine SIC pourrait prendre en charge l'articulation de cette interdisciplinarité en suivant les deux recommandations suivantes :

#### Évaluer nos pratiques interdisciplinaires en milieu urbain

Il s'agit de renforcer le partage interdisciplinaire des pratiques et des expériences. Cela peut être envisagé par i) la capitalisation par retours d'expérience, par exemple sur les « éco-quartiers » et ii) l'identification des freins et des accélérateurs entre acteurs. Cette proposition est valable en termes d'interdisciplinarité mais aussi d'intersectorialité. Au total, il s'agit d'engager un travail d'observation de nos démarches interdisciplinaires, un travail de réflexivité sur nos pratiques qui alimenterait aussi, à terme, l'acceptabilité sociale des changements structurels suscités par nos travaux.

#### Structurer l'observation au regard d'enjeux interdisciplinaires

Le SNO Observil au sein de l'IR OZCAR ainsi que les ZA « Environnementale et Urbaine » et « Armorique », sont des avancées majeures et structurantes dans le paysage de l'observation urbaine et contribue largement à la visibilité des recherches de la communauté SIC. Offrant

une observation fiable sur le long terme, ces dispositifs d'observation ne peuvent toutefois pas être multipliés pour s'adapter à tous les contextes rencontrés dans les milieux fortement anthropisés (e.g. sols pollués, friches industrielles, etc.). Le contexte et les enjeux propres aux milieux urbains obligent à identifier des questions partagées avec une communauté académique bien plus large que les SIC, mais aussi avec les acteurs de la société civile de manière à ce que les données et connaissances produites puissent efficacement appuyer les politiques publiques.

La communauté SIC souhaite pouvoir connecter les observables actuellement mesurés dans Observil à ceux d'autres communautés INSU (e.g. ceux de la communauté OA : ACTRIS ou ICOS-ville). Une meilleure articulation des observations pourrait s'appuyer sur des campagnes communes d'échantillonnage et le renforcement de l'interopérabilité des bases de données. Des rencontres dans l'esprit des journées ANR « Ville », du PEPR VDBI pourraient être proposées de manière récurrente, par exemple sous forme de journées de travail ou séminaire « milieu urbain INSU » de manière à amplifier les synergies en partageant les savoir-faire et les retours d'expérience.

Renforcer le lien entre Observil, les OHM et les ZA permettrait de fédérer les approches interdisciplinaires et notamment de rapprocher SHS et sciences de l'environnement en milieux urbains dans lesquels ces dernières sont particulièrement actives. La participation croisée de plusieurs sites d'Observil dans les Zones Ateliers devrait faciliter la tâche. L'intégration pluridisciplinaire peut également être facilitée par la création de démonstrateurs multi-acteurs (« observatoires multidisciplinaires ») tels que des « Sites Master Ville » d'OZCAR. La plateforme d'observation « TERRA FORMA » pourrait être déployée dans ces Super-sites urbains au titre des « observatoires nouveaux de l'Anthropocène » associant les scientifiques académiques et d'autres acteurs (e.g. citoyens, gestionnaires, opérationnels, décideurs, législateurs, etc.).

Les deux points suivants concernent les modalités de coconstruction des connaissances avec la société civile.

## Organiser la transdisciplinarité

Afin de renforcer les liens avec le monde socio-économique, particulièrement pertinents dans les milieux urbains, il est souhaitable : i) de mieux coordonner l'interface entre les acteurs académiques et socio-économiques en lien avec l'aménagement du territoire et la surveillance opérationnelle (protection des populations face aux risques environnementaux et amélioration de la résilience et de la durabilité des villes); ii) de développer des tableaux de bord partagés avec les opérationnels, basés sur la richesse en indicateurs que peuvent proposer les scientifiques de la communauté SIC et d'autres disciplines; iii) de coconstruire des plans de gestion intégrant à la fois la prise en compte de la conservation des processus (e.g. mangroves), les besoins et aspirations des communautés locales (ressources, biens et services) pour une gouvernance durable et équitable; iv) de favoriser de nouveaux modes de transfert des connaissances vers les opérationnels et décideurs. Les seules publications scientifiques ne suffisent pas car elles ne sont pas lues par les acteurs de terrain. Les cahiers des GREC sont l'un des modes de transfert cités en exemple.

Même si les liens avec les acteurs du monde socio-économique (e.g. gestionnaires, collectivités, opérationnels, industriels, etc.) apparaissent particulièrement pertinents et nécessaires dans les milieux urbains, les recommandations pour leur renforcement ne diffèrent pas des autres contextes et sont donc reprises dans le chapitre ad hoc (cf. chapitre « Continuum Sciences-Société et Transdisciplinarité » p. 116).

De nouvelles structures peuvent toutefois être imaginées, en s'inspirant, par exemple, des « Communautés de Savoir Ville Durable » de l'IRD, du défi « Territoire du Futur » du CNRS ou en promouvant le développement des « Urban Living Labs ». Ces derniers, à définir en tenant compte des spécificités territoriales, s'appuient sur des collectifs de travail disciplinaire, en interaction, et bénéficient du concours de l'ensemble des acteurs de la société civile (e.g. collectivités, législateurs, industriels, opérateurs, citoyens, etc.). L'enjeu sera de mettre ces multiples structures en résonance dans un paysage déjà très complexe.

L'organisation du dialogue avec les décideurs et opérationnels pourra également bénéficier de la dynamique générée par les PEPR (dont VDBI). Enfin, les communautés académiques peuvent intégrer des structures d'échanges avec la société civile (type GREC ou initiative Paris-Recherche) initiées par des partenaires non-académiques.

## Consolider, développer et organiser les liens avec les citoyens

De par sa densité démographique, le milieu urbain est un terrain de jeu propice aux actions de sciences

participatives. Les recommandations pour leur renforcement ne diffèrent toutefois pas des autres contextes et sont donc reprises dans le chapitre « Continuum Sciences-Société et Transdisciplinarité : coconstruction de la recherche-action pour accompagner la transition des territoires », p. 116.

De nombreuses initiatives spécifiques ont toutefois pu voir le jour de manière opportuniste à l'occasion de projets. La communauté SIC devrait veiller à structurer davantage ces actions, après avoir fait un bilan des recherches-actions déjà engagées, et à intégrer ces pratiques dans les dispositifs d'observation comme le SNO Observil et/ou les Zones Ateliers. Enfin, le milieu urbain est un hotspot de création artistique et d'activités culturelles. Les démarches artistiques et culturelles pourraient être davantage considérées comme vecteur d'accessibilité des recherches environnementales pour le grand public, comme le propose le PEPR Transform en cours de montage.

### Références

- CAUE (Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement), 2020. *Cours Oasis*, <https://www.calameo.com/read/004055278574d74b1615a>
- INSU, 2024. *Livre Blanc paléoclimats et paléoenvironnements*, <https://www.calameo.com/read/0064605873cfcaba812c7>
- MTE, 2021. *Un environnement, une santé*. <https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/pnse4.pdf>
- MTE, 2020. *Guides de valorisation hors site des terres excavées dans des projets d'aménagement*. <https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr/guide/valorisation-hors-site-tex>
- Norra S., 2009. *The astysphere and urban geochemistry—a new approach to integrate urban systems into the geoscientific concept of spheres and a challenging concept of modern geochemistry supporting the sustainable development of planet earth*. *Environ Sci Pollut Res* 16, 539–545. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0183-8>
- Séré G., Schwartz C., Ouvrard S. et al., 2010. *Early pedogenic evolution of constructed Technosols*. *J Soils Sediments* 10, 1246–1254. <https://doi.org/10.1007/s11368-010-0206-6>
- Snep R.P.H. & Clergeau P., 2012. *Biodiversity in Cities, Reconnecting Humans with Nature*. In: Lofness, V. (eds) *Sustainable Built Environments*. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series*. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0684-1\\_296](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0684-1_296)
- Younès C., 2008. « La Ville-Nature », *Appareil*. <https://journals.openedition.org/appareil/455>. <https://doi.org/10.4000/appareil.455>
- Zalasiewicz J., Waters C.N., Williams M., 2014. *Human bioturbation, and the subterranean landscape of the Anthropocene*. *Anthropocene*, 6, 9-14. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2014.07.002>

# 03 | Défis méthodologiques et de mise en œuvre

OBSERVONS LES OBSERVATOIRES	98
DONNÉES EN SIC : MESURES ET INSTRUMENTATION, SERVICES ET ENTREPÔTS, OUTILS ET MODÈLES	104
CONTINUUM SCIENCES-SOCIÉTÉ ET TRANSDISCIPLINARITÉ : COCONSTRUCTION DE LA RECHERCHE-ACTION POUR ACCOMPAGNER LA TRANSITION DES TERRITOIRES	116
RESPONSABILITÉ ENVIRONNEMENTALE DE LA RECHERCHE EN SIC	124
FORMATIONS — MÉTIERS — COMPÉTENCES	134
PROGRAMME NATIONAL ÉCOSPHÈRE CONTINENTALE ET CÔTIÈRE — EC2CO	142

# Observons les observatoires



Cette prospective a bénéficié de quatre documents fondateurs, consignant les réflexions récentes et collectives sur l'observation dans le domaine SIC. Il s'agit notamment d'analyses prospectives d'infrastructures de recherche nationales (OZCAR, RZA, ILICO, eLTER) comme de SNO INSU ou le devenir des LabEx. La *Landscape Analysis* de l'ESFRI est également un document de cadrage. Les réflexions collectives menées à Saint-Malo visaient donc à aller au-delà de ce que la communauté avait déjà proposé à travers ces documents.



Pyranomètre installé à la station d'écologie de Lamto, Côte d'Ivoire. Le Pyranomètre est un capteur d'irradiance qui permet de quantifier le taux et la durée d'ensoleillement à la parcelle, en  $W/m^2$ .

© Sandrine Anquetin / IGE

## Les enjeux

Les arguments en faveur de l'observation long terme des zones critiques et d'interfaces Terre-Mer, anthropisées ou non, restent identiques à ceux mentionnés dans le document de prospective SIC 2018-2022. **Ce qui a changé depuis la dernière prospective est, sans aucun doute, le contexte, qu'il soit scientifique ou organisationnel aux échelles nationales ou européennes, dans lequel s'est déployée et doit se renforcer cette stratégie d'observation long terme.** Ceci est d'autant plus nécessaire que **le paysage français des outils d'observations est complexe** (IR, OSU, LabEx, SNO, ZA, OHM, observatoires régionaux structurés au niveau national); ce qui rend le paysage peu lisible aux niveaux international et même national, notamment pour les interlocuteurs de la société civile et les utilisateurs non-académiques, décideurs, gestionnaires, qui eux-mêmes gèrent parfois des observatoires.

Au-delà du défi structurel lié à la coconstruction d'un espace européen des Observatoires SIC, cette prospective a permis d'imaginer ensemble les contours de **l'observation du futur** ou, dit autrement, de l'observation en mesure de relever les principaux défis, à savoir :

- documenter et rendre intelligibles les trajectoires spatio-temporelles complexes des systèmes socio-bio-géo-physico-chimiques qui composent les zones

d'interfaces et/ou anthropisées ;

- se servir des observatoires comme **outils d'intégration des disciplines scientifiques** qui ont pour objet d'étude la zone habitable de notre Terre et réinventer les représentations de cette zone habitable ;
- **faire émerger une science** soucieuse de répondre aux enjeux de la **gestion durable des territoires** (utilisation responsable des ressources, atténuation des risques) en associant tous les acteurs et usagers de ces territoires ;
- faire des observatoires **des lieux de formation** initiale et continue.

Il s'agit également de **renforcer les échanges entre thématiciens et spécialistes du développement des capteurs**, entre observations, données, modèles et méthodes. Cet enjeu est au cœur du chapitre suivant « Données en SIC », p. 104.

Par ailleurs, à l'heure de la généralisation des mesures à haute fréquence, du développement de techniques d'analyse et d'imagerie toujours plus performantes et du besoin d'observations spatialisées à haute résolution, se pose la question de l'impact environnemental de l'observation et de l'utilité de tous ces capteurs et instruments. Ces enjeux sont largement décrits dans les deux chapitres suivants « Données en SIC », p. 104 et « Responsabilité environnementale », p. 124 et ne seront donc pas abordés dans ce chapitre.

# Les questions scientifiques

Les questions de **compréhension** et de **simulation** de l'évolution des zones critiques et d'interfaces Terre-Mer, anthropisées ou non, sont au cœur de cette prospective. Y répondre est nécessaire pour appuyer les décisions des gestionnaires, et pour contribuer à des projets de territoire adossés à la connaissance ; ces questions nécessitent la mise en œuvre d'**approches systémiques** (« *whole system approach* ») permettant l'intégration d'observations et de modèles développés par différentes disciplines. Cette intégration doit prendre en compte toutes les échelles temporelles, y compris les temps longs (temps géologiques).

Bien que les scientifiques soient de plus en plus sollicités pour répondre aux questions sur l'**habitabilité des territoires** et sur la manière de les rendre plus durables et résilients, les observatoires n'en documentent qu'une toute petite partie. Le livre blanc « *Le futur des observatoires de recherche français et leur contribution à l'IR européenne eLTER* » indique que « *L'observatoire du futur est un observatoire inventant une « science des lieux » et impliquant les acteurs* ». L'implication de la société civile et la **coconstruction des recherches avec les acteurs socio-économiques des territoires** sont ainsi mises en avant et déployées dans des territoires (ZA, OHM, Living Labs, territoires apprenants, etc.), obligeant à repenser la place du scientifique et la manière dont les dispositifs d'observations sont mis en œuvre et à réfléchir comment les instruments déployés et les données produites peuvent être appropriés par les citoyens.

En zone côtière (spécialement dans les estuaires/deltas), la spatialisation des mesures d'observation continue est

cruciale, ces zones étant situées dans de **forts gradients écologiques, biogéochimiques et climatiques** : des pistes de réflexion sont en cours d'expérimentation pour tenter de mesurer et comprendre les variations spatio-temporelles dans ces zones d'interface Terre-Mer. L'élévation du niveau de la mer, les tempêtes plus fréquentes en lien avec l'érosion littorale, les bloom de phytoplancton, les événements d'anoxie ou d'hypoxie menacent les interfaces Terre-Mer, mettant en danger les écosystèmes, les infrastructures et les habitants dans un contexte d'urbanisation massive.

L'observation long terme permet de **détecter les phénomènes rares**, d'identifier les **points de bascule**, des « hot moments/spots », la signature de **perturbations émergentes** et d'en décrire les occurrences (accélération en lien avec les changements globaux) et leurs conséquences.

Les territoires sentinelles de l'environnement, que sont les Suds y compris les outremer français, abritent une grande biodiversité, des enjeux humains importants. Ils sont les premiers impactés par les conséquences des changements globaux et les événements extrêmes. La modification de socio-écosystèmes peut par ailleurs avoir des impacts régionaux voire mondiaux (e.g. déforestation en Amazonie). Pour mieux comprendre les phénomènes et adapter les modèles globaux, il reste nécessaire d'adresser la **variabilité spatiale et temporelle des zones critiques et d'interfaces Terre-Mer, anthropisées ou non**, à **étudier** en s'attachant à mener ces questions dans un cadre partenarial renforcé notamment pour les territoires non français.

## Forces et opportunités

### Forces

Les observatoires français accueillent une **recherche de rang international** adossée à la **mesure des variables et processus clés des hydro-géo-socio-éco-systèmes**. Ils sont engagés dans le développement de **méthodes innovantes en métrologie de l'environnement**. Déployés au Nord comme au Sud, ils couvrent une large gamme de contextes. Ils bénéficient d'un corps de fonctionnaire dédiés unique au monde.

Le **cycle de la donnée** (production/qualité/bancarisation) est un enjeu primordial et de nombreux progrès ont été réalisés ces dernières années à l'appui de la relation entre les IR d'Observation et les pôles de données de l'IR Data Terra (e.g. système d'information THEIA/OZCAR, et portail ILICO en cours de développement). Cette structuration prépare l'intégration européenne des observatoires français et fluidifie les allers et retours entre l'observation et la modélisation, le développement d'outils

d'intelligence artificielle (IA) et/ou de machine-learning.

Enfin, grâce à cette structuration nationale, les **complémentarités entre infrastructures** (notamment OZCAR, RZA, ILICO) sont renforcées par le soutien national à long-terme et placent la communauté SIC dans une situation favorable pour une observation plus intégrée de la zone habitable, dépassant les limites disciplinaires. Ceci est totalement en cohérence avec la feuille de route nationale des infrastructures de recherche pour créer un paysage des IR d'observation, d'expérimentation, de logistique et de calcul inégalé en Europe et compétitif au niveau international.

### Faiblesses

Ces forces sont contrebalancées par plusieurs points de faiblesse :

Mesure de débit en régime torrentiel,  
Massif des grandes Rousses.  
© Catherine Coulaud / IGE



- de nombreux compartiments et variables sont encore peu ou mal intégrés dans les dispositifs actuels quand bien même les enjeux liés à leur observation sont majeurs notamment pour engager des approches systémiques; ceci concerne le sol et ses usages, le sous-sol, le vivant (e.g. microorganismes, végétaux, animaux), les milieux très anthropisés et les estuaires;
- l'insuffisante colocalisation des observables SIC (e.g. parcelles RENECOFOR, sites ILICO et RZA, ou des sites de mesures d'écologie, rarement colocalisés avec les sites de mesures de l'IR OZCAR. Ceux-ci sont rarement ou pas colocalisés avec ceux d'autres IR nationales (RZA, ACTRIS, ICOS) ou issus de réseaux de surveillance des acteurs opérationnels (Banque Hydro, ONF, Agences de l'Eau, EdF, etc...);
- l'agilité modérée des observatoires à répondre à des besoins ou défis émergents, voire à reconfigurer leur mode opératoire dans un contexte de crise environnementale aiguë (cf. chapitre « Responsabilité environnementale de la recherche en SIC » p. 124);
- le besoin de renforcer la coconstruction de questionnements avec les acteurs du territoire pour l'étude des socio-écosystèmes dans leur complexité pluri- et interdisciplinaire pour mieux aborder les enjeux et répondre aux besoins sociétaux;
- le manque de conventions cadres et de partenariats stratégiques avec les dispositifs d'observation opérationnels pilotés par certains services de l'état (e.g. MTES, Agences de l'Eau, OFB, ONF, parcs naturels ou régionaux, etc.) qui collectent des données, trop souvent ignorées du monde académique et réciproquement, même si des progrès sont constatés (e.g. certains protocoles ILICO totalement en ligne et utilisés par les partenaires comme l'OFB pour des suivis dont les données récoltées sont brassées puisque corollaires aux données académiques). Notons que les données d'observation pourraient devenir de réels points de convergence entre les dynamiques académiques et opérationnelles;
- l'insuffisante prise en compte des outremer malgré des priorités nationales claires et ambitieuses (e.g. feuille de route Outremer du CNRS) et des risques écosystémiques majeurs localement;
- la difficulté à fournir et à diffuser des « services » à destination des communautés académique et non académique alors que c'est l'une des missions principales des IR.

## Opportunités

L'émergence de projets nationaux structurants (type PIA4) (e.g. le projet ciblé Carbonium du PEPR FairCarboN, et des projets ciblés des PPR-RiOMar, PPR FuturObs, PPR-Futurisks, PPR Mediation, PPR MAHEWA, PEPR OneWater, PEPR TRANSFORM, PEPR IRiMA, PEPR TRACCS, PEPR SoluBioD, PEPR BRIDGES, PEPR MathsVives) permet de renforcer les observatoires (e.g. instrumentation, ressources humaines, etc.), chacun dans son domaine d'action, ce qui va dans le bon sens. La partie côtière du PPR Océan et Climat, par exemple, s'est montée en lien étroit avec ILICO et s'articule maintenant autour de cette IR. Néanmoins, nous devons rester vigilants sur ces projets, souvent dédiés à un objet ou une thématique (e.g. le sol, le sous-sol, l'eau, les solutions fondées sur la nature, le carbone, etc.), qui créent des réseaux parallèles de sites parfois déconnectés des infrastructures existantes.

Pour accompagner les enjeux d'observation dans un contexte de responsabilité environnementale, plusieurs projets visent à développer des capteurs low cost (e.g. Equipex+ TERRA FORMA), à déployer des sciences participatives et à accompagner la transformation des territoires (WP4 « du capteur à l'action » de TERRA FORMA), avec un intérêt constant pour l'image satellite et les travaux en partenariat avec le CNES. Un groupe de travail du GDR Labo1.5 réfléchit à la quantification du coût carbone des IRs en environnement. Ces initiatives vont dans le bon sens, et invitent à un réel changement dans les pratiques de la recherche, la manière dont ce type de projet et les scientifiques qui les conduisent sont évalués, la manière de considérer les savoirs profanes, la manière de mettre en œuvre le dialogue Science — Société.

La feuille de route des infrastructures européennes (eLTER, JERICO) influence naturellement l'organisation des observatoires en Europe et doit constituer un levier de leur développement. Elle a vocation à optimiser les collaborations, favoriser les synergies et les complémentarités et ainsi, éviter les doublons, travailler en commun sur les indicateurs et les services qui y sont produits, sur les données tout au long de leur cycle de vie dans le cadre d'une gestion FAIR. Elle doit catalyser une meilleure coordination entre les différents états et institutions (organismes nationaux et universités), un partage des ressources et d'objectifs partagés.

# Recommandations

## Poursuivre l'observation long terme et engager de nouveaux observatoires

- Mieux comprendre la dynamique des interfaces biotiques/abiotiques, et renforcer l'automatisation des observations.
- Identifier les lieux critiques : micro-forêts, rhizosphère, interfaces Terre-Mer (mangroves, lagunes, herbiers, etc.), milieux arides, permafrost, tourbières, sols salinisés, systèmes agricoles (en particulier culture irriguée), territoires artificialisés pour mieux comprendre les processus aux interfaces.
- À partir de l'existant, identifier une dizaine de « super-sites d'observation », ancrés sur des questions scientifiques coconstruites avec les acteurs des territoires et utilisés comme vitrine pour améliorer la lisibilité des démarches d'observation aux niveaux international et national. Il ne s'agit pas pour autant de diminuer le soutien aux observatoires de taille plus modeste qui demeurent essentiels pour l'observation long terme de l'ensemble des lieux critiques.
- Mettre des moyens sur le long terme pour renforcer la recherche aux interfaces (e.g. SIC/OA, biotique/ biotique, sciences biogéophysiques/SHS), autour de socio-écosystèmes caractéristiques (forêts, agro-systèmes, villes, zones de montagne, outre-mers, littoraux, etc.).
- Réfléchir à la création de nouveaux observatoires en

lien avec les transformations anthropiques majeures de l'environnement (e.g. impact de l'éolien en mer), issus de demandes conjointes de chercheurs et d'acteurs locaux des territoires.

- Renforcer, sans la disperser, l'observation dans les Suds et dans les outremer français qui sont des sentinelles de l'environnement global et les premiers impactés par les conséquences des changements globaux. Ce renforcement doit s'appuyer sur un fort partenariat avec les institutions locales comme le fait l'IRD avec les SNO de la ceinture tropicale.

## Construire les observatoires du futur et promouvoir la science des lieux dans leur dimension systémique

- Coconstruire avec les porteurs d'enjeu les questions scientifiques en lien avec des enjeux sociétaux.
- Renforcer les expérimentations et les observations interdisciplinaires, en s'appuyant sur un réseau multi-capteurs/multi-acteurs.
- Poursuivre l'effort de colocalisation des outils d'observation SIC pour une large caractérisation (physique, chimique et biologique) afin d'acquérir une connaissance plus intégrée du fonctionnement des zones d'interfaces anthropisées.

Mésocosmes intérieurs de la plateforme LiecOscope (LIEC, STAR LUE\*). L'étude, menée dans le cadre du projet ANR PRCI ECOTREE (2016-2022), porte sur l'évaluation du devenir des Terres Rares, leur bioaccumulation et leurs effets biologiques dans des conditions proches de l'environnement en reproduisant un réseau alimentaire d'eau douce. Six espèces modèles de trois niveaux trophiques différents (algues, macrophytes, crustacés, bivalves, poissons) ont été exposées à un mélange de trois Terres Rares représentatives : néodyme (Nd), gadolinium (Gd) et ytterbium (Yb) pendant 28 jours.  
\*STAR LUE : Structure d'Appui à la Recherche Lorraine Université d'Excellence  
© Manuel Pelletier et Nicolas Lachaux / LIEC



- Cette colocalisation contribuera à renforcer la caractérisation biologique des observatoires SIC.
- Faciliter l'accès aux données opérationnelles et aux données du privé (par ex. les pratiques agricoles, prélèvements d'eaux) et identifier les colocalisations possibles avec les réseaux des différents acteurs (e.g. agences de l'eau, EDF, etc.).
- Faciliter l'observation participative en menant des initiatives de sciences participatives pour faire face à la décroissance des réseaux de mesures opérationnels, et donner plus d'agilité à la stratégie d'observation. Il s'agira d'impliquer un plus large public en mettant à disposition des capteurs, en le formant à l'acquisition et à la bancarisation, en impliquant les territoires dans l'identification des sites (e.g. CoastSnap).
- Renforcer et affiner la communication auprès des différents acteurs locaux afin de valoriser et disséminer les données des réseaux d'observation vers le grand public et les décideurs.
- Faire de la FAIRisation des données un socle commun des observatoires SIC.
- Engager une démarche d'observation frugale dans la définition et la mise en œuvre de nouveaux observatoires environnementaux. Ce terme de « frugalité » englobe les notions de low cost, de low tech, d'open source, d'accessibilité, de sobriété, de durabilité, de simplification, d'empowerment, d'efficacité et de participation. Ces innovations concernent en particulier les observatoires de l'hémisphère sud qui concentrent actuellement les efforts de la communauté scientifique pour répondre au besoin d'homogénéisation spatiale des réseaux d'observation installés jusqu'à présent principalement dans l'hémisphère nord, mais devraient être étendues à l'ensemble des observatoires.

## Vers une structuration nationale plus agile et responsable sur les enjeux environnementaux

- Faciliter les liens inter-instituts et inter-organismes
  - Organiser les instruments et les équipements nationaux de manière moins sectorielle pour faciliter leur mobilisation dans des approches systémiques.
  - Renforcer les liens et interactions entre les IR (e.g. partages de retours d'expérience et de bonnes pratiques).
  - S'assurer que les agences poursuivront les travaux initiés dans le cadre du GT infrastructure d'AllEnvi favorisant les échanges de données entre les organismes (CNRS, IRD, CIRAD, INRAe, etc.), les laboratoires, les IR (e.g. RéGEF, OZCAR, ILICO) et l'inter-opérabilité des données au travers d'une politique de stockage et de mise à disposition.

- Porter à connaissances les instruments et les équipements nationaux (Newsletter, Journée de démonstration, etc.).
- À propos des liens avec les PEPR / PPR
  - Intégrer les responsables des IRs dans la gouvernance des PEPR/PPR.
  - Favoriser la bancarisation des données des PEPR/PPR par les observatoires.
  - Dans les appels à projets des PEPR
    - Favoriser le financement des équipements long terme dans les IR.
    - Favoriser les projets qui s'inscrivent dans les OSU/SNO/IR.
- À propos de la construction européenne des IRs
  - Identifier ce qui doit être soutenu dans le cadre de la construction européenne et ce qui doit l'être dans un cadre plus strictement national.
  - Définir et partager un plan stratégique précisant en particulier l'accompagnement et le devenir des dispositifs restant en dehors des IR européennes.
- Se doter d'outils d'évaluation de l'impact environnemental des observatoires et promouvoir les solutions frugales et/ou sobres.

## Enjeux sur les ressources humaines

- Pour faciliter la mutualisation du parc instrumental
  - Identifier les personnels dédiés aux instruments et équipements nationaux.
  - Reconnaître le temps de formation des utilisateurs pour les personnels dédiés aux équipements nationaux.
  - Disposer d'outils de gestion des équipements et de mise à disposition des procédures d'utilisation (e.g. GMI développé par la DT INSU).
- Faciliter la mise en cohérence des ressources humaines avec les ambitions des observatoires, au travers des OSU et des infrastructures, avec notamment une implication renforcée des universités pour la reconnaissance des services d'observation réalisés par les enseignants-chercheurs.

## Mieux engager nos observatoires dans les enjeux de formation

- Renforcer et déployer plus généralement des offres de formations pour les gestionnaires en ouvrant davantage vers l'apprentissage et la formation continue.
- Initier les vocations de demain en proposant des jumelages entre les observatoires et les écoles et/ou collèges et/ou lycées en faisant davantage connaître nos dispositifs auprès des rectorats.

# Données en SIC: mesures et instrumentation, services et entrepôts, outils et modèles



Il apparaît que le triptyque observations-expérimentation (*in situ* ou en laboratoire)/stockage et diffusion des données/modélisations des socio-écosystèmes, peut être appréhendé comme un continuum de la donnée (Figure 1). Pour le producteur de données, se pose en effet l'obligation :

- d'anticiper la diffusion et la mise à disposition la plus large possible de ses résultats dès leur acquisition ;
- d'en assurer non seulement la qualité mais aussi la pertinence pour décrire et comprendre les socio-écosystèmes ;
- d'alimenter des modèles qui eux-mêmes doivent aider à prédire et comprendre l'évolution de ces milieux ;
- d'aider *in fine* à mieux observer spatialement et temporellement les milieux naturels ou à mieux définir les expérimentations en laboratoire.

Ce continuum doit par ailleurs s'inscrire dans une démarche intégrant plus largement la notion de service à la société civile tout en prenant mieux en compte le coût environnemental de ces différentes activités.

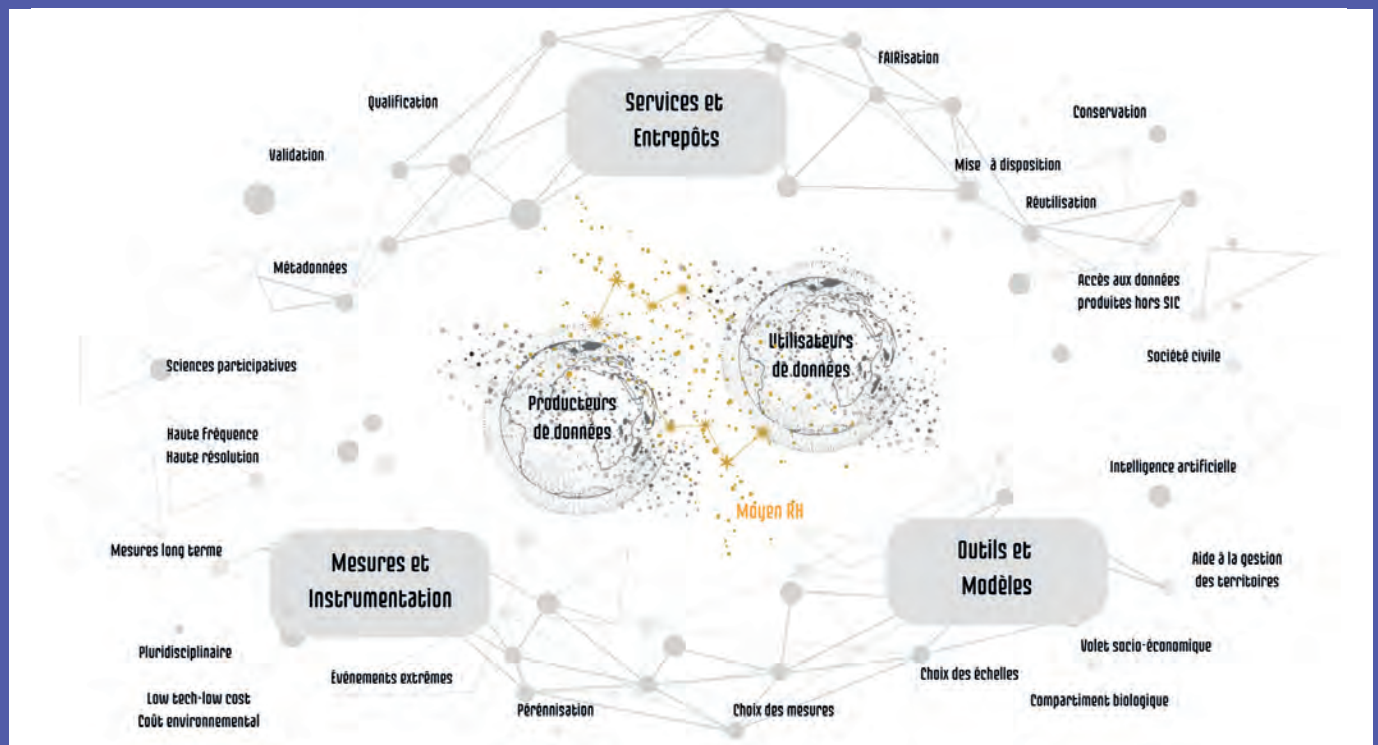


Figure 1. Représentation schématique du continuum des données en SIC et principaux mots clés apparus lors de la prospective SIC.

Après avoir fait un bilan des principaux enjeux, la suite de ce chapitre sera organisée en trois grands thèmes :

- Mesures et instrumentations : les méthodologies, les outils et les développements envisagés par la communauté.
- Services et entrepôts : les thématiques autour des données, de leur gestion à leur mise à disposition.
- Outils et modèles : les différents modèles et les évolutions souhaitées dans le futur.

## Les enjeux

Le premier enjeu est d'acquérir **des données pluridisciplinaires** (bio-géo-physico-chimiques) issues de l'observation *in situ*, des travaux en laboratoire en conditions contrôlées et des modélisations numériques et analogiques, sur de vastes **gammes d'échelles spatiale et temporelle**. L'observation du compartiment biologique (notamment le compartiment microbiologique), l'acquisition de données avec d'autres acteurs publics et privés, l'intégration de données issues des SHS et des personnes issues de la société civile seront aussi à renforcer dans les années à venir.

L'ensemble des activités expérimentales en laboratoire ou sur le terrain, impliquent de **poursuivre et concilier le développement et le déploiement de moyens de mesures**, entre autres low-cost/low tech, avec **une démarche scientifique écoresponsable**, et qui doit, là encore, de plus en plus **intégrer des communautés non issues des SIC** (e.g. les collectivités locales). L'impact environnemental et sociétal de nos travaux doit être mieux anticipé, et ce, dès le montage des projets de recherche.

Il s'agit également d'**assurer une chaîne cohérente des données depuis leur acquisition et leur validation, à une mise à disposition ouverte**, et ceci malgré une grande diversité de méthodes d'acquisition de ces données multivariées. Ces jeux de données aux caractéristiques temporelles et spatiales très variables sont impératifs pour mieux imaginer et comprendre la diversité et la complexité des socio-écosystèmes. Par ailleurs, **l'articulation entre la structuration nationale des données et les producteurs locaux** est en enjeu majeur, ainsi que la réflexion sur les moyens RH dédiés à ces activités.

Concernant le volet modélisation, **il faut améliorer la prise en compte du compartiment biologique, des petites échelles et des processus associés**. Une **meilleure intégration du volet socio-économique** est identifiée comme un axe d'amélioration de ces modèles.

Il s'agit également de poursuivre le **couplage/chaînage** de modèles existants pour aller vers de la modélisation plus intégrée (e.g. modélisation de la Zone Critique, interactions avec l'atmosphère, etc.).

Dans le cadre de cette prospective, la communauté SIC a fait état qu'il était indispensable d'**améliorer les échanges** entre modélisateurs, entre modélisateurs et utilisateurs, et entre modélisateurs et mathématiciens/développeurs. Les modèles accessibles à la communauté scientifique, avec des ressources humaines et matériels adéquats pour maintenir et poursuivre les développements, **doivent également être utiles aux gestionnaires et décideurs territoriaux avec des échelles pertinentes vis-à-vis des enjeux** (temporelle comme un événement extrême, ou spatiale à l'échelle d'un quartier).

Les développements des moyens d'observations et d'analyses, comme ceux des modèles numériques, impliquent de **traiter un flux et une quantité de données de plus en plus importants**. L'un des enjeux, au-delà des moyens de communication, de stockage et de traitement à mettre en œuvre, sera de **prendre en compte l'usage de l'IA** dans ces activités (pré-traitement de données, tri des observations, optimisation des modèles).

Globalement, **les moyens techniques et humains dédiés à la production, à la diffusion et la modélisation des données et des processus identifiés dans les recherches en SIC** se doivent d'être consolidés et pérennisés. Des éléments de structuration de la communauté existent (e.g. OZCAR, RZA, OHM, etc.) et certains sont apparus ces dernières années (PEPR, CS IIT et son PN IIT, RTCE, RéGEF, TERRA FORMA). Ceux-ci doivent être mieux connus et partagés au sein de la communauté SIC, afin de faciliter le travail des différents acteurs. Ils devront être valorisés au sein du pôle de données et de services pour les surfaces continentales THEIA, de l'IR Data Terra.

## Les questions scientifiques

### Mesures et instrumentation

Les moyens expérimentaux et méthodologiques déjà en place au sein de la communauté SIC, doivent être consolidés voire amplifiés de même que ceux dédiés à l'observation fine (haute fréquence/résolution) des écosystèmes (cf. chapitre « observons les observatoires » p. 96), et ceci tout en prenant en compte le coût environnemental de nos activités.

### L'instrumentation de laboratoire

En ce qui concerne les **instruments de laboratoire**, la mise en place de plateformes, avec des fonctionnements

et des formalismes de plus en plus partagés et cadrés par les différentes tutelles, tend à accroître l'offre de services. Il reste néanmoins des développements instrumentaux à poursuivre et des services à consolider dans certains domaines comme pour les questions de datation ou d'imagerie (archives sédimentaires, la dendro-chronologie, les techniques OSL/thermoluminescence ou tomographie, etc.), ou encore de géochronologie (e.g. isotopes cosmogéniques, <sup>14</sup>C, U-Th, etc.) avec des applications qui concernent maintenant des minéraux supergènes (kaolinite, hématite et goethite, oxydes de manganèse ; cf. chapitre « Intégration des différentes échelles d'espace et de temps dans l'étude des SIC »

p. 48). Les approches génomiques et post-génomiques (ADNe, métagénomique, etc.) appartiennent également à un domaine qui reste à développer et nécessitent une structuration des moyens spécifiques aux recherches en SIC, avec la contrainte des matrices à étudier, et surtout des besoins conséquents de postes en biologie moléculaire, en bio-informatique ou en bio-statistique. En ce sens, les plateformes telles que regroupées dans l'IR RÉGEF doivent jouer un rôle plus important et visible au sein de SIC pour centraliser les compétences, harmoniser les pratiques et fédérer les utilisateurs autour de ces ressources. Enfin, les outils de caractérisation à petites échelles, spatiales ou temporelles, restent un enjeu pour les futures années, afin de documenter les mécanismes physiques, chimiques ou biologiques qui pourront ensuite être intégrés aux échelles supérieures. On peut citer par exemple, les expériences sur grands instruments avec des outils comme la ligne FAME UHD (ligne CRG à l'European Synchrotron Radiation) ouverte à la communauté SIC, des développements attendus sur des techniques permettant des analyses temporelles dynamiques à l'échelle de la nano/pico seconde, l'utilisation de la microscopie électronique à très haute résolution, de techniques d'analyse à l'échelle submicronique dédiées à l'analyse du carbone (STXM, NanoSIMS) ou encore la poursuite du développement des techniques de

caractérisation moléculaire de la matière organique ou d'outils permettant des analyses à l'échelle de la cellule (analyse d'image, imagerie photonique et confocal), avec des analyses résolues spatialement, en mode single cell, des mesures phénotypiques cellulaires ou des mesures isotopiques à l'échelle cellulaire.

Les moyens analytiques en laboratoire doivent également s'adapter à plusieurs évolutions qui impliquent des volumes de résultats de plus en plus conséquents avec souvent des méthodes et des outils de traitement associés de plus en plus élaborés. Les résolutions de plus en plus fines pour les techniques d'imagerie, l'augmentation des sensibilités analytiques qui permettent d'atteindre des concentrations de plus en plus faibles et de distinguer des contaminants et leurs produits de dégradation, ou encore la tendance à des analyses chimiques ou biologiques sans *a priori*, devront être mises en adéquation avec des moyens matériels et RH contraints. Il s'agira donc pour la communauté de trouver le bon équilibre entre des questions scientifiques, légitimes et indispensables pour mieux comprendre et anticiper les évolutions des surfaces et interfaces continentales en particulier en lien avec le dérèglement climatique, et des contraintes de ressources matérielles et humaines. La communauté a clairement exprimé le souhait d'acquérir une meilleure

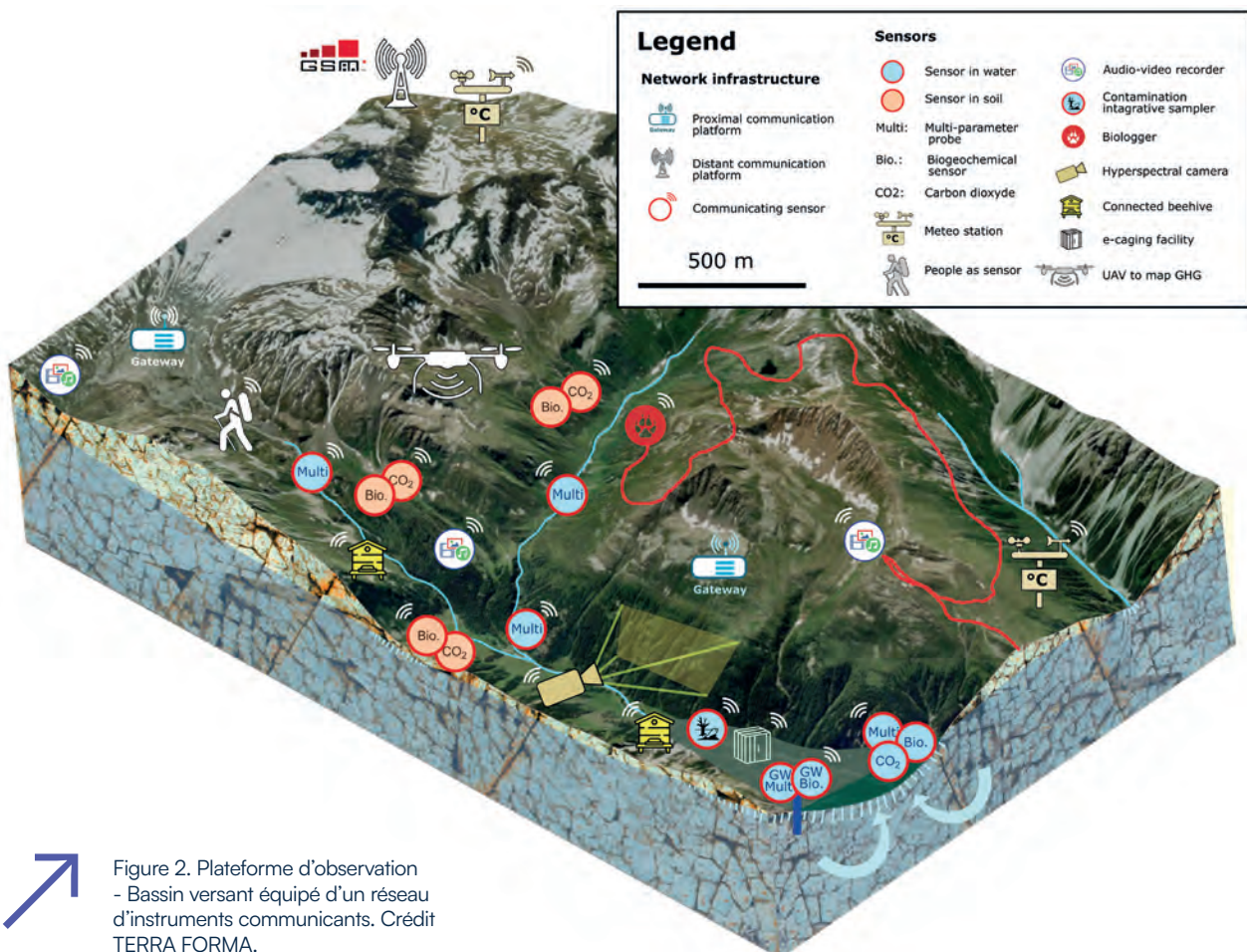


Figure 2. Plateforme d'observation - Bassin versant équipé d'un réseau d'instruments communicants. CrédiT TERRA FORMA.

connaissance des différents moyens et des compétences des personnels associés, au travers de bases de données ou de catalogues accessibles en ligne, et de favoriser le partage d'expériences et de méthodologies.

### L'instrumentation *in situ*

L'instrumentation *in situ* subit une évolution de paradigme avec le changement d'échelle, pour mieux appréhender la complexité des processus (approche multi-messagers ; Figure 2, p. 105), combiné aux opportunités d'accéder à des capteurs bas-coût. Ceci passe notamment par i) de nouvelles façons de collecter les flux de données (transmission des données et suivi à distance de l'acquisition et contrôle de l'instrument) disponibles grâce aux technologies de l'internet des objets, ii) le développement d'instrumentation low-cost et/ou frugale qui devient possible grâce à des technologies en accès libre (Arduino, Raspberry, etc.), ou iii) l'apport de la fabrication additive et les possibilités de miniaturisation (e.g. Equipex+ TERRA FORMA). Au-delà des opportunités technologiques, la communauté attend une instrumentation capable de s'adapter et de suivre les événements extrêmes de plus en plus fréquents (asservissement pour observer des phénomènes ponctuels, résistance, gamme de mesure adaptée). Il faut augmenter les capacités de mesures à hautes fréquences et haute résolution/haute densité (vision multi-messagers) pour capturer les phénomènes complexes, comme par exemple les sites hot spot ou présentant des conditions spécifiques (environnements contraints ou en voie de disparition, contrainte d'autonomie ou de transmission). La communauté attend également une instrumentation capable d'aller plus loin dans la mesure (plus de précision, petites échelles, large spectre, etc.) et dédiée à de nouveaux enjeux ou à des fins de modélisation plus poussée. Par exemple, la forte émergence des contaminants nouveaux (comme les micro/nanoplastiques) nécessite un suivi spécifique lié à chaque polluant dans des compartiments (eau, sol, biosphère) et sur des supports très variés. Cet essor technologique ainsi que les possibilités de calcul au service d'équipes interdisciplinaires s'accompagne d'un besoin de renouveler les stratégies d'acquisition (développement méthodologique). La perspective de « communs technologiques » (e.g. la ressource numérique imaginée et initiée par l'Equipex+ TERRA FORMA avec le soutien de la DT INSU, Ifremer et le forum du RTCE) doit favoriser les synergies interdisciplinaires et l'innovation, selon l'adage que chaque instrument offre de nouvelles connaissances. Ces défis instrumentaux impliquent désormais la diminution du coût énergétique et de l'impact écologique (instruments éco-compatibles, recyclables, faible émission CO<sub>2</sub> en phase de conception, etc.). Enfin, il est nécessaire d'adapter cette instrumentation à son utilisation par des communautés au-delà des SIC dans le cadre de plateformes multi-domaines et trans-instituts.

La prise en compte du coût environnemental dans le domaine SIC passe par une **meilleure valorisation des échantillons prélevés *in situ***, avec la conservation

des échantillons naturels et des analyses en matrice complexes dans des espaces de stockage partagés et ouverts. Cela impliquerait de mettre en place une véritable stratégie nationale qui n'est pas nécessairement axée sur des grands centres/lieux de stockages (BRGM, Ifremer, INRAe, etc.), mais qui pourrait reposer sur des infrastructures régionales ou locales, comme les universités ou des conservatoires dans le cadre de partenariats. L'infrastructure ReColNat (<https://www.recolnat.org/fr/>) est un bon exemple : elle gère des échantillons en botanique, zoologie et paléontologie. Une extension aux échantillons SIC (eau, sol, etc.) pourrait être envisagée. **Les mesures de télédétection satellitaires, aériennes et par drones** permettent également de minimiser l'effort sur le terrain tout en permettant une observation fine. Toutefois, une validation et une calibration sur le terrain restent nécessaires. Ces mesures ont récemment bénéficié de larges progrès permettant un élargissement de la couverture et la fréquence des mesures satellitaires qui présentent un intérêt pour les SIC. Ces nouveaux produits restent néanmoins assez mal connus. D'autre part, des travaux en cours sur les moyens drones et LIDAR (GT 4D et Data Terra), offrant des observations et mesures à petite échelle et haute résolution, viennent compléter ces produits sur la donnée satellitaire à couverture au sol plus large. De nouvelles problématiques se posent alors : celle du traitement de ces données, de leur stockage et de leur diffusion, celle de la structuration des moyens opérationnels et celle de la validation et calibration des données spatiales avec des capteurs au sol.

## Services et entrepôts

### Paysage des infrastructures et dispositifs d'aide à la gestion des données

L'IR Data Terra a, au travers de son pôle THEIA, vocation à centraliser l'accès aux données/produits de données des différents acteurs de l'ESR à partir d'entrepôts au plus près des producteurs de données. Le rôle de Data Terra et de ses pôles —et sans doute plus largement la science ouverte— est souvent mal appréhendé par la communauté SIC et non suffisant pour accompagner au mieux le changement des pratiques.

Un **catalogue global des services des OSU**, matures et en construction, vers les SNO/ZA apparaît intéressant à mettre à disposition. Ces services principalement développés aux échelles locales sont au plus proche des observatoires et sont à même de dégager des tendances, besoins et conseils concernant les RH impliqués et la gestion des données en entrepôts. Les entrepôts locaux sont parfois les mieux adaptés aux données spécifiques (e.g. données issues de mésocosmes) au contraire des entrepôts nationaux ou internationaux présentant des formalismes (métadonnées, format de données) moins adaptés.

D'expérience, les notions de *data paper*, de DOI et d'entrepôts semblent bien connues mais pas toujours

pratiquées. En revanche, le **paysage des entrepôts est complexe** : DataIndores et EasyData pour les données de longues traînes, ceux plus anciens (Zenodo qui n'est pas labellisé TRUST, pangea), et plus récemment RechercheDataGouv, sans compter les entrepôts thématiques et les entrepôts locaux à l'échelle des SNO, des OSU ou des universités. Il semble indispensable que ce niveau de gestion et de curation des données puisse bénéficier de ressources humaines en adéquation avec les enjeux, afin de jouer pleinement son rôle dans l'organisation nationale des données, tout en assurant le soutien et la formation des agents dans les unités. Les outils informatiques, l'expertise et le conseil pour une organisation rationnelle de la e-infrastructure nationale, que propose Data Terra avec son projet GAIA DATA sont également à considérer.

Ce travail de prospective a bien mis en évidence l'écart entre, d'une part, une structuration et une stratégie nationale, et d'autre part, des besoins locaux qu'ils soient dans la connaissance des outils et des dispositifs actuels, ou bien dans le souhait de disposer de ressources de proximité. Avec des articulations entre sites ou moyens d'observation/SNO/entrepôts aux niveaux national et international, et des pratiques plus partagées sur le format des données et des métadonnées, l'expérience des autres domaines de l'INSU est certainement à mieux partager avec la communauté SIC.

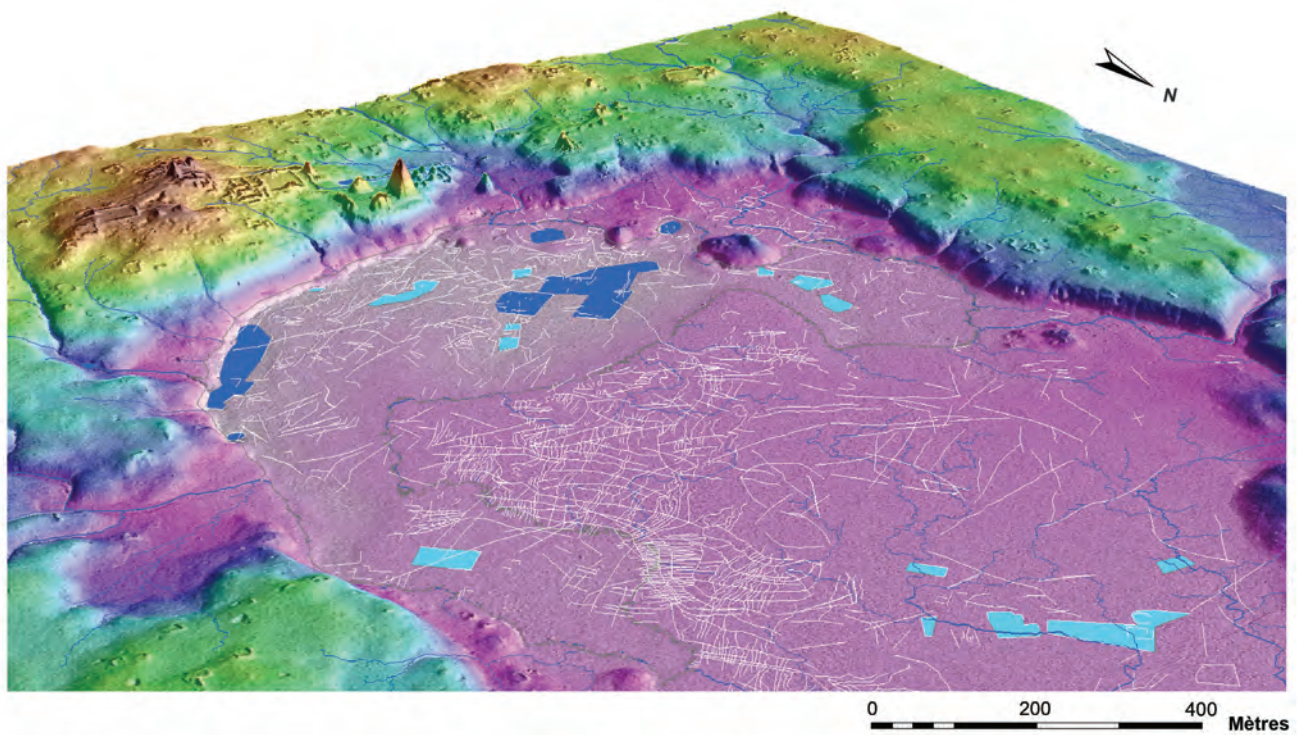
L'**inter-opérabilité des données** et leur cohérence, restent des sujets pour la communauté. Si des entrepôts, gérés localement (OSU, SNO, Unité) ou nationalement, avec des règles de dépôts sur les formats et les métadonnées associées existent, la multiplicité des mesures et observations effectuées, autant en nature qu'en qualité ou en fréquence d'acquisition, semblent encore constituer des freins à la mise à disposition la plus ouverte possible des données au-delà des personnes qui assurent leur production.

### Besoins en observation

Les séries temporelles longues, décennales à pluri-décennales, sont très attendues pour dégager des tendances ou s'affranchir d'une variabilité pluriannuelle

Aménagements hydrauliques des marais à des fins d'agriculture intensive découverts à proximité du centre du site de fouilles de Naachtun, et cartographiés grâce à la technologie Lidar (détection et estimation de la distance par laser). Le réseau blanc correspond à un système de canaux alternant avec des champs cultivés et les aplats bleus correspondent à des réservoirs d'eau. Lidar a mis en valeur l'ampleur des aménagements du paysage par les populations mayas de la période dite classique (150 à 950 après J.-C.) et a permis de revoir largement à la hausse la densité d'occupation humaine de la région à cette époque (plus de 62 000 structures repérées). Enfin, cette cartographie a révélé une inter-connectivité insoupçonnée des cités mayas entre elles, via la construction de longues chaussées ou encore l'usage de systèmes défensifs élaborés.

© Cyril CASTANET / LGP / CNRS images



RESERVOIRS



CANAUX ET CHAMPS



COURS D'EAU TEMPORAIRES



ALTITUDE (en mètres)



ou journalière. Il en découle de fortes attentes sur la production de nouvelles données de terrain répondant aux contraintes suivantes :

- une continuité dans l'espace, avec une couverture aussi complète que possible de l'objet observé ;
- une continuité dans le temps, i.e., des données sans lacune (donnée non acquise = donnée perdue) sur la durée la plus longue possible ;
- une diffusion des données la plus rapide possible, en temps quasi-réel, notamment pour le suivi des évènements catastrophiques ;
- une fréquence d'acquisition dynamique (fréquence, mesures, etc.) en fonction de la dynamique du système ;
- une diffusion des données de qualité avec un descriptif des limites des méthodes d'acquisition, une donnée qualifiée et sans biais grâce à un protocole connu.

En ce sens, les données satellites deviennent de véritables atouts pour l'ensemble de la communauté, mais à condition que l'accès soit facile et connu.

Ces séries temporelles doivent répondre également à un caractère d'inter-comparaison en s'appuyant sur l'harmonisation des pratiques d'observation (protocoles) à l'échelle des observatoires. Comme pour les données, la « DOIsation » des protocoles pourrait favoriser l'échange de bonnes pratiques d'observation.

Dans une perspective d'analyse des séries temporelles, les données pourraient s'enrichir de celles **produites par des tiers** tels que des établissements publics avec soit une mise à disposition sans condition ou bien sous forme de conventions cadres (données dites sensibles, ex. flore-faune, EDF avec sa renationalisation récente), soit avec des portails d'accès aux données fonctionnels. Par exemple, l'accès aux données hydrométriques publiques est essentiel pour la recherche en hydrologie, mais le site Hydroportail, qui remplace depuis début 2022 la banque Hydro, se doit à l'heure de l'écriture de ce rapport d'être optimisé. D'ailleurs, parmi les premières priorités identifiées par une partie du programme OneWater Data (du PEPR One Water), figure la mise à disposition FAIR de ces données de la banque Hydro, mais aussi des données sur les nappes. De manière plus générale, il apparaît important sur certaines thématiques comme le cycle du Carbone, d'inclure rapidement l'ensemble des organismes qui produisent des données sur un même sujet, et d'avoir une cartographie des entrepôts actuels. Au-delà, il pourrait s'agir de coconstruire les outils d'accès aux données sur l'exemple de l'IGN avec ces partenaires tiers « certifiés ».

Les **données issues de la société civile** (données des dispositifs de sciences participatives, des entreprises, des organismes de contrôle et de surveillance des milieux, etc.) apparaissent également attractives, notamment lorsque les données sont issues de protocoles établis en concertation avec les scientifiques (cadre d'une recherche-action), sont suffisamment nombreuses (grands jeux de données) pour une approche statistique ou sont générées indirectement (e.g. mise en route des essuie-glaces des voitures en ville pour avoir une répartition fine des précipitations). Pour ce type de données, l'enjeu porte sur les méthodes de qualification de la donnée,

avec parfois des manques dans sa spatialisation et la régularité de l'acquisition/animation. Les projets de type Living Lab sont peut-être un cadre à développer pour améliorer la qualité des données obtenues, et favoriser ainsi leur utilisation et leur diffusion.

Enfin, de **nouvelles données issues de champs disciplinaires plus éloignés** notamment en SHS (économie, sociologie, neurosciences, etc.), qu'elles soient quantitatives ou qualitatives (e.g. perception de la nature, perception de restauration ou d'aménagement), mériteraient une plus grande attention, au travers d'appels à projets interdisciplinaires sur l'exemple de ceux déjà soutenus par la MITI (e.g. projet CASPA).

### Des compétences nouvelles et aux interfaces à acquérir

Le **besoin en experts de la donnée**, et de personnes pouvant prendre en charge de grands jeux de données et/ou d'images comme par exemple le traitement des données LIDAR, qui impliquent le développement d'algorithmes devient grandissant (cf. chapitre « Formations — Métiers — Compétences » p. 132). D'un autre côté, l'évaluation des SNO et la prospective associée avaient clairement mis en évidence le manque de ressources RH dédiées à la gestion et à la diffusion des données d'observation dans certains observatoires.

Trois profils d'experts de la donnée se distinguent pour lesquels il conviendrait de programmer les besoins à un horizon de 5 à 10 ans :

- **Data Manager** (proche des données de la collecte à la curation en entrepôt), avec des compétences aux interfaces thématiciens-informaticiens. Il s'agit d'avoir des profils de personnes qui connaissent bien les capteurs ou les techniques d'imagerie. La question de la formation et de l'accompagnement des agents qui sont directement impliqués dans la collecte des données (les CNAP en particulier, mais aussi les opérateurs à la paillasse ou les instrumentalistes qui développent des outils d'observation) se pose. La mise en binôme avec les experts de la donnée pour monter en compétence et assurer cette tâche pourrait être une solution à envisager ;
- **Data Analyst** (capable d'extraire des données brutes à partir d'un existant (Big Data) pour en tirer des conclusions et développer des outils stratégiques) ;
- **Data Scientist** (spécialiste qui saura mettre en place des modèles prédictifs mathématiques et l'IA).

Bien que le développement de la chimiométrie soit une approche pertinente pour traiter des quantités importantes de données, en particulier pour des recherches de sources sans *a priori*, le besoin pour les IR OZCAR et RZA, les SNO et les PEPR, se situe en premier lieu sur les *data manager* et sans doute, dans le cas des PEPR, à un horizon plus proche (2 à 5 ans).

### Vers une meilleure utilisation des données

À l'ère de la FAIRisation des données, de nouvelles approches voient le jour dans la manière d'appréhender l'observation et la donnée. D'une part, la frugalité

observationnelle vise à exploiter de façon exhaustive des données déjà acquises (projets ALAMOD & Carbonium du PEPR FairCarboN), ce qui implique le plus souvent d'harmoniser les jeux de données. D'autre part, la frugalité numérique suggère de faire le choix des données à conserver ou pas. Ce faisant, une réflexion doit être portée par la communauté SIC pour mieux appréhender la conservation des données, leur exploitation et leur réutilisation.

Au-delà du milieu académique, la traduction et la diffusion de ces données à destination de tiers (organismes, agences, individus) en termes de services (e.g. services climatiques tels que proposés dans le PEPR TRACCS), doivent être un sujet pour la communauté dans les prochaines années, et posent question sur les méthodes de diffusion et d'appropriation de la donnée dans TERRA FORMA et THEIA.

Cette meilleure utilisation des données implique également de penser à la formation des personnels (techniciens, ingénieurs, chercheurs) et des étudiants afin que dans les prochaines années, ce sujet soit de plus en plus intégré dès la construction des projets de recherche ou inclus dans le fonctionnement des plateformes d'observation ou d'analyses en laboratoire.

## Outils et modèles

Les besoins en modélisation concernent toutes les activités de la recherche en SIC (hydrologie, agronomie, pollution des plastiques, biogéochimie, atmosphère, etc.). À ceci s'ajoute la caractéristique propre aux SIC concernant la nécessité d'intégrer le plus souvent plusieurs approches (physiques, biologiques, chimiques, géologiques), et d'être en capacité de modéliser sur une large gamme d'échelle d'espace et de temps (du bassin versant aux échelles moléculaires). De plus, la demande

de développer des modèles prédictifs et d'aide à la décision de gestionnaires locaux sur le territoire semble être un critère qui continue d'émerger. Si les modèles globaux restent nécessaires, la tendance à fournir des modèles avec une résolution spatiale plus adaptée aux problématiques des socio-écosystèmes locaux est importante.

### Développement de nouveaux modèles

En général, les besoins portent sur le développement de nouveaux modèles dans le but de mieux appréhender les processus bio-géo-chimiques étudiés à la fois pour un aspect fondamental et pour aider des décideurs publics.

Les besoins exprimés portent sur des modèles pour l'inversion de données de tous types (chimiques, thermiques, biologiques, géophysiques, etc.), du laboratoire au terrain, avec pour objectif d'exploiter de façon quantitative les données afin d'apporter des contraintes pertinentes aux processus explorés. Ceci implique des données intégrées qui contiennent plusieurs niveaux d'informations à extraire (e.g. caractérisation physico-chimique du sous-sol) et le besoin d'analyser la complémentarité des informations fournies par différents types de données. Les principaux verrous scientifiques pour cela sont :

- mettre en place des stratégies d'inversion adaptées au type de données considéré ;
- développer des modèles directs assez efficaces en temps de calcul pour être utilisés dans ces stratégies d'inversion ;
- utiliser high performance computing (HPC) et intelligence artificielle (IA) pour accélérer les temps de calcul de ces modèles directs ;
- avoir des modèles directs à la physique cohérente pour ce que l'on souhaite caractériser (hétérogénéités structurales, suivis géochimiques, etc.).

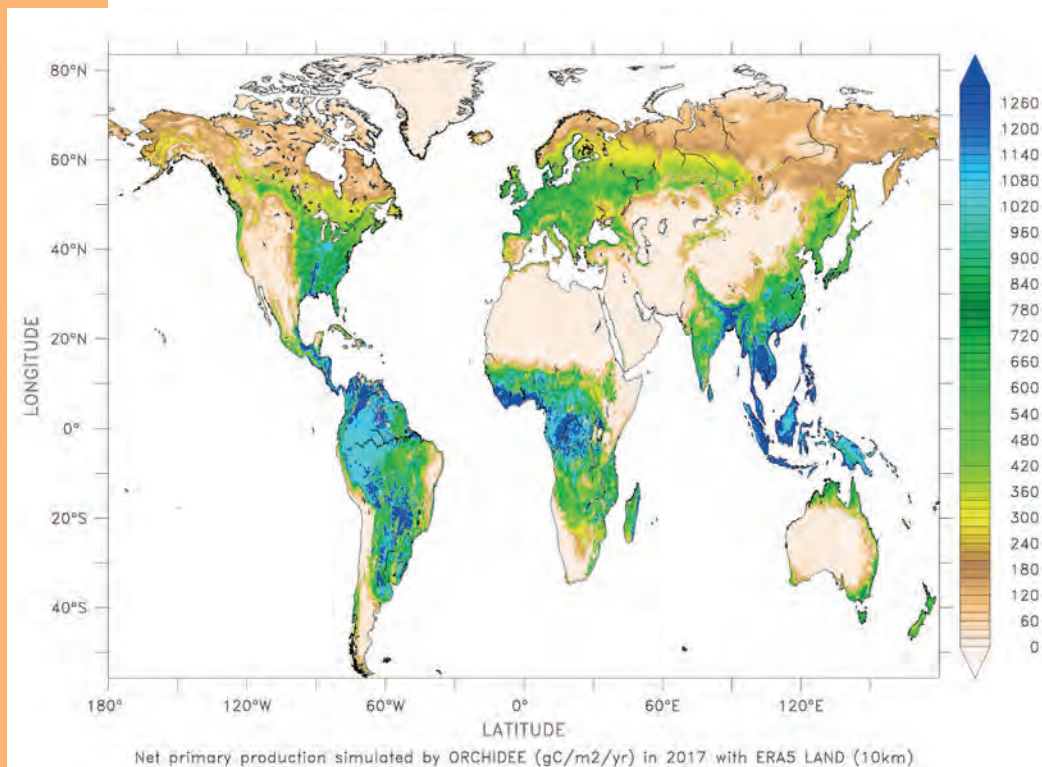
À ceci s'ajoutent les difficultés de portage et de



La responsable de ligne, Delphine Vantelon transfère un échantillon dans l'enceinte expérimentale de la ligne de lumière LUCIA à SOLEIL (Ligne Utilisée pour la Caractérisation par Imagerie et Absorption). Cette ligne permet l'étude de la distribution spatiale et la spéciation d'éléments par micro-fluorescence et par micro-spectroscopie d'absorption des rayons X, dans différentes matrices, sols, sédiments, plantes.  
© Patrick DELANCE / Synchrotron SOLEIL



La carte représente une simulation de la productivité primaire nette annuelle pour l'année 2019 (gC/m<sup>2</sup>/an) par le modèle de surfaces continentales ORCHIDEE (Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems) à partir du forçage climatique ERA5-Land à une résolution de 10kmx10km.  
© Nicolas VIOVY / LSCE.



diffusion des codes développés pour les partager avec la communauté, et la difficulté d'avoir un suivi continu du développement de modèles mis en œuvre par des membres non-permanents (post-docs, thésards, CDD, etc.).

Un point particulier évoqué par la communauté SIC est celui du manque d'animation d'une communauté RTM (*Reactive Transport Model*) au sein des SIC, comme cela existe à l'INSMI par exemple. Ceci pourrait s'accompagner d'un appel à projets spécifique qui porterait sur les développements méthodologiques des modèles et pas seulement sur les développements thématiques, afin de sortir de l'angle outils pour mieux traiter la recherche sur ces modèles. Cela permettrait certainement de lever certains verrous liés aux modèles de transport réactif (couplage, changement d'échelle, hétérogénéités, performances numériques, etc.) appliqués à la Zone Critique.

### Amélioration des outils de modélisation

L'amélioration de modèles est axée sur deux aspects principaux : l'**amélioration technique** comme par exemple le développement d'une documentation adéquate, la diminution du temps de calcul, ou le risque « d'explicitabilité » (il s'agit d'être en mesure d'expliquer le fonctionnement du modèle et de s'assurer de la pertinence des résultats produits des outils développés lorsqu'ils sont trop complexes) et l'**amélioration des processus** représentés. L'amélioration des processus concerne plusieurs aspects : couplage de modèles, croissance de réalisme dans les processus représentés, interdisciplinarité, prise en compte des incertitudes des simulations et amélioration de l'assimilation de données au travers l'intelligence artificielle. Dans les prochaines années, les améliorations devront concerner :

- la prise en compte de sites particuliers/hot spots qui peuvent avoir un poids sous-estimé dans certains modèles (e.g. le cas du cycle du carbone avec le rôle des estuaires, des tourbières, ou des sédiments lacustres, ou des barrages et des retenues d'eau qui peuvent constituer des spots d'émission de GES) ;
- l'amélioration à toutes les échelles temporelles et spatiales des modèles relatifs au cycle du carbone ;
- l'intégration de données issues d'autres champs disciplinaires, telles que des données macro-économiques ou sanitaires, par exemple, ou encore géophysiques, ainsi que les données issues de différentes méthodes de collecte, telles que les données satellitaires, données de champ et données de laboratoire ;
- l'intégration des processus aux petites échelles (colloïdes, microorganismes, interfaces minérales) ;
- l'identification du degré de pertinence des données à prendre en compte dans les modélisations.

### Couplage/chaînage des modèles existants pour aller vers de la modélisation plus intégrée et inclusive

Concernant les modèles aux petites échelles (e.g. moléculaires, interfaces minérales, membranes biologiques, échelle particulaire ou colloïdale, etc.), leur intégration aux échelles supérieures reste d'actualité et devient de plus en plus impérative (cf. chapitre « Intégration des différentes échelles d'espace et de temps dans l'étude des SIC » p. 50). Ceci inclut notamment l'augmentation de la durée et la taille des simulations (de type dynamique moléculaire ou mésoéchelle), l'intégration du biote afin de se rapprocher des systèmes réels, ou encore la capacité de reproduire des systèmes hors équilibres. Le couplage

avec des modèles grandes échelles comme ceux des communautés océan ou atmosphère, permettant de mieux prendre en compte les effets sur des milieux régionaux, voire plus localisés territorialement est aussi un point d'attention.

Le couplage des modèles biosphère et modèles chimie-transport, déjà évoqué, est un enjeu en soi. En particulier, la prise en compte des activités biologiques au sens large reste un point de progrès pour les modèles. Ceci implique, entre autres, une meilleure intégration du rôle des microorganismes, de leur potentielle adaptation phénotypique, ou encore des données de l'écophysiologie ou de l'écologie fonctionnelle.

### **Prise en compte des événements extrêmes, et de leur modélisation**

La communauté SIC a souligné les difficultés qu'ont les modèles pour traiter les événements extrêmes, ou accidentels, qui peuvent avoir un impact non négligeable sur certains cycles de nutriments, de contaminants ou du carbone. Par exemple, le besoin de développer des scénarios hors projections climatiques classiques, ou bien incluant des événements comme des crues ou des périodes d'étiage, est apparu. La communauté MSC (Modélisation des Surfaces Continentales) indique par exemple qu'ils ne sont pas bien préparés sur des événements de rivières intermittentes, ou de la fonte totale des glaciers. Cette difficulté est encore plus importante lorsque la résolution spatiale de l'événement est petite, comme les cas des îlots de chaleur en ville, ou au niveau d'un estuaire. À l'inverse, l'extrapolation des résultats locaux à des échelles globales constitue toujours un challenge à relever.

### **Apports et développement de l'intelligence artificielle**

L'intelligence artificielle apparaît comme ayant un potentiel très élevé pour aborder certaines questions et applications (spécialement en tant qu'outils de prévision et d'émulation). La modélisation doit bénéficier de forts développements et de la poursuite de l'intégration de l'IA, notamment pour l'optimisation des temps de calcul, l'exploration de paramètres pour la recherche

d'optimums, la construction de modèles de substitution, ou encore pour découvrir ou prédire des couplages non identifiés. Cependant, des risques « d'explicabilité » perdurent, qui nécessitent des expertises spécifiques. L'IA embarquée peut également constituer une aide pertinente à l'observation (prétraitement des données sur site, régulation de l'acquisition des données en fonction des conditions du milieu), ou encore pour le traitement des données (recherche d'anomalies sur des phénomènes observés).

Les demandes de soutien RH pour le développement de ces techniques/outils doivent être associées à la construction d'une plateforme d'échanges sur ce sujet, avec la difficulté de n'être pas compétitif sur le marché de l'emploi pour ces différents métiers. Les compétences demandées sont des informaticiens, des mathématiciens (en concertation avec l'INSMI), des développeurs logiciels, des ingénieurs de recherche pour les différents volets du travail numérique : développement de logiciels de calcul scientifique, optimisation des codes en HPC, portabilité et diffusion des codes. Il apparaît également nécessaire de favoriser le rapprochement entre les modélisateurs au sens large, et les différentes disciplines présentes en SIC.

### **Meilleure connaissance par la communauté des différents modèles et outils offerts, avec la question du support sur le long terme de ces outils et de leur mise à jour**

L'un des challenges de la communauté SIC, en plus de bien connaître et de partager les nombreux modèles qui existent, sera dans les prochaines années d'être en mesure d'offrir des services et des outils en dehors de la communauté SIC non seulement en direction des gestionnaires ou des décideurs locaux, mais aussi de la société civile afin de mieux faire comprendre la nécessité de nos recherches. Dans cette dernière optique, la capacité des modèles à pouvoir prédire des évolutions des socio-écosystèmes à des échelles régionales, locales, voire du quartier ou de la rue, tout en étant cohérent avec des modèles globaux du climat par exemple, demeure un sujet d'attention.

## **Forces et opportunités**

L'une des spécificités des recherches en SIC concerne la pluridisciplinarité des thématiques nécessitant l'acquisition d'une multitude de données de nature différente, à des pas de temps très variables et sur des échelles spatiales très larges. Ceci constitue la richesse et la force de ce domaine, mais nécessite une forte structuration. Les opportunités sont très nombreuses, aussi bien dans le domaine de la recherche fondamentale qu'appliquée, avec des attentes très fortes de la société car les thématiques abordées s'ancrent pleinement dans

les questionnements actuels liés aux différentes transitions environnementales.

### **Forces**

La grande force de la communauté SIC repose sur sa capacité à constituer des équipes interdisciplinaires et pluridisciplinaires que ce soit pour la collecte des données (approche holistique), le développement instrumental ou les approches par modélisation. Cette

force réside dans les thématiques mêmes traitées par la communauté qui nécessitent *de facto* l'intégration de données multi-sources. Ainsi par exemple, il paraît inconcevable de comprendre la dynamique d'un écosystème tel que la ville sans prendre en compte l'ensemble des compartiments (trames vertes, zones commerciales, réseau d'eau, etc..) et leurs interactions. Ainsi, la communauté est naturellement structurée au sein projets et de programmes de recherche de taille variable (locaux à européens) dans lesquels l'acquisition de données et la modélisation sont au cœur des discussions : données pertinentes, fréquence et spatialisation de l'acquisition, stockage et diffusion de l'information, degré d'intégration dans les modélisations, retour sociétal des résultats. L'une des conséquences immédiates de cette force est la capacité à répondre rapidement à des sollicitations extérieures, comme par exemple lors d'évènements extrêmes, voire de catastrophes, ou de mise en place de grands programmes nationaux ou internationaux.

## Opportunités

La communauté SIC bénéficie d'une très bonne perception des thématiques abordées par « le grand public » permettant de justifier les demandes de moyens et d'intéresser directement la société civile dans le cadre

de la science participative. En effet, les thématiques et les approches sont en forts liens avec les préoccupations sociétales actuelles et futures, et il peut être plus facile de mobiliser les différents acteurs de la société pour la mise en place de dispositifs d'observation *in situ* ou l'accès à certaines données, ou encore pour acquérir des moyens d'analyses et de traitement.

Il y a aussi une forte attente des territoires, des décideurs politiques et de la société en général, mais avec des exigences différentes selon les degrés d'implication des résultats issus des données acquises. Ceci nécessite de communiquer de manière très efficace pour éviter de « décevoir » et de frustrer ces différents acteurs de la société civile qui peuvent attendre plus de la communauté SIC que ce qu'elle peut réellement fournir scientifiquement.

La communauté propose et met œuvre des projets de taille variable, et dispose d'un ensemble de dispositifs complémentaires : appel à projets (e.g. EC2CO), PEPR, observatoires qui structurent naturellement des groupes interdisciplinaires, et aussi des dispositifs qui offrent la possibilité de mieux partager les outils analytiques ou d'observation comme l'IR RéGEF, l'Equipex+ TERRA FORMA, ou les dispositifs labellisés par l'INSU comme les parcs d'instruments nationaux (PIN) ou les sites instrumentés (SI). Toutefois certains de ces dispositifs sont peut-être encore trop peu connus de la communauté.

# Recommandations

## Thématiques scientifiques

En dehors des thématiques « classiques », les objets scientifiques suivants sont apparus importants à mettre en place car ils répondent à un réel manque au sein de la communauté.

- **Créer un RT RTM (Reactive Transport Model) spécifique à la communauté SIC.** La communauté travaille depuis plusieurs années sur cette thématique à partir différentes approches depuis l'observation *in situ* jusqu'aux simulations numériques, mais ces dernières restent encore trop « frustes » pour rendre compte de la complexité des géoécosystèmes. La création d'un RT permettrait de faire un saut important en abordant la modélisation de l'ensemble des processus impliqués dans la nature, depuis les échanges chimiques jusqu'aux aspects biologiques, encore trop peu intégrés. Les retombées sociétales seraient importantes par exemple pour la prédiction des migrations de polluants émergents en interaction avec la microbiologie, ou le stockage de CO<sub>2</sub> sous différentes formes physiques, chimiques ou biologiques. Cette recommandation s'adresse à la communauté qui peut proposer ce RT à l'INSU et CNRS Écologie & Environnement.

- **Renforcer l'appel d'offres LEFE-EC2CO dédié aux**

### flux entre atmosphère et surfaces continentales.

L'atmosphère interagit de manière complexe et peu comprise avec les surfaces continentales. Les flux de particules et d'éléments chimiques sont évalués pour les composants principaux, mais une grande partie reste à évaluer depuis l'échelle locale (la parcelle ou la ville) à l'échelle mondiale. Les flux de nouveaux contaminants restent l'un des points critiques pas assez qualifié et quantifié. L'appel d'offres LEFE-EC2CO pourrait permettre de répondre à ces interrogations.

## La modélisation numérique dans le domaine SIC

Le déficit de connaissance et d'appropriation de la modélisation numérique et des modèles développés actuellement en SIC est apparu de manière criante au travers de cet exercice de prospective. Il est d'autant plus critique avec l'émergence massive de l'IA. Plusieurs étapes sont nécessaires et certaines doivent être mises en œuvre rapidement pour avancer sur cet aspect critique pour un grand nombre de personnes de la communauté. Les deux recommandations suivantes peuvent être mise en place rapidement, sans surcoût important.

- **Réaliser un inventaire exhaustif des modèles numériques et codes communautaires** disponibles dans la communauté SIC avec un descriptif de leur objectif, de leurs fonctionnalités, de leur degré d'accessibilité et des modalités de mise en œuvre. Cette recommandation s'adresse à la CS SIC.

- **Créer une plateforme numérique d'échanges entre mathématiciens et modélisateurs** du domaine SIC. Une concertation voire une coordination avec d'autres instituts du CNRS et la MITI apparaît aussi nécessaire. Cette recommandation s'adresse à l'INSU, qui pourra peut-être mobiliser les autres instituts du CNRS.

- **Soutenir le développement des modèles avec des moyens RH conséquents** en informatique, en développement de logiciel, et en mathématiques. Ceci doit s'accompagner d'une stratégie de déploiement de ces modèles à l'échelle nationale, en concertation avec les différents instituts du CNRS, les organismes nationaux de recherche et EPIC impliqués dans les thématiques SIC. Cette recommandation s'adresse à la direction de l'INSU et aux autres tutelles, et aux unités qui doivent intégrer ces demandes dans leur gestion prévisionnelle des emplois et des compétences.

- **Créer un appel d'offres consacré aux développements numériques méthodologiques/logiciels** spécifiques aux SIC, non centré sur les objets étudiés. Un exemple pourrait être un AAP numérique visant i) à fédérer les expertises de développement numériques, et ii) à intégrer des processus encore mal pris en compte dans les modèles actuels (e.g. prise en compte de l'adaptation des microorganismes). Cette recommandation pourrait s'adresser à la CS SIC avec le PN EC2CO, ou à la MITI afin éventuellement de mobiliser des compétences hors INSU.

- **Acculturer et former la communauté SIC à l'IA et ses possibilités** (cf. chapitre « Formations - Métiers - Compétences » p. 132). Des actions nationales de formation pourraient et devraient inciter la communauté à intégrer l'IA dans leur approche. Mais, ceci ne pourra se faire qu'après une information soutenue de la communauté. Cette recommandation s'adresse au CFMI de l'INSU, aux porteurs de réseaux métiers qui pourraient favoriser cette acculturation de la communauté, ou encore TERRA FORMA ou l'IR RéGEF.

## Production de données et développements instrumentaux

Les recommandations sur les aspects de production des données sont très diversifiées, mais les moyens RH restent le point le plus sensible, voire critique, dans certains cas pour mener à bien certaines opérations. Il faut noter que ces demandes concernent tous les niveaux de qualification. La mutualisation des moyens instrumentaux, la construction de nouvelles méthodes et de moyens de mesures reposent sur le maintien de ressources humaines pour les sites d'observations, i.e., de personnels qualifiés et pluridisciplinaires avec une connaissance du

continuum capteur/donnée/entrepôts, et de compétences en instrumentation à l'interface technologique/chercheur.

- **Mieux communiquer sur les données satellitaires disponibles** en mettant en place un site qui les recense avec les liens et un descriptif accessible à tout le monde.

- **Poursuivre le développement de centres de stockage ou de banques d'échantillons** partagés à l'échelle de la communauté (e.g. carothèque). La première étape pourrait porter sur une implication nettement plus forte du domaine SIC dans RECOLNAT. Il serait pertinent que la communauté SIC contribue plus aux réflexions en cours à l'échelle de l'IR RéGEF en ce sens.

- **Soutien au projet de ressourcerie des développements instrumentaux en SIC** en lien avec TERRA FORMA, CS IIT, RTCE, DT INSU. Pour cela, dans un premier temps, il faudrait certainement mieux communiquer sur les actions menées par TERRA FORMA, notamment en termes de développements techniques. Cette action s'adresse à TERRA FORMA et la CS IIT pour le volet information sur ce projet, et surtout à l'ensemble des acteurs de la communauté SIC impliqués dans des développements instrumentaux.

- **Consolider voire augmenter les moyens RH en termes de soutien à la production de données**, en particulier pour les observations *in situ*. Une attention particulière devrait être portée à la chaîne de validation et de diffusion des données, au caractère multidisciplinaire des mesures à effectuer (profil ingénieur en approches écosystémiques), et à des profils instrumentalistes/développement instrumental.

- **Augmenter et structurer les moyens RH dédiés à la gestion des données** à des niveaux facilitant l'articulation entre les producteurs de données et les structures nationales: Data-Manager/Analyst/Scientist. À ces fins, il conviendrait de mieux définir le rôle des OSU dans une stratégie nationale sur cet aspect avec pour objectif d'avoir dans chaque OSU une équipe type minimale en charge i) d'aider les utilisateurs, ii) de développer des outils, et iii) de contribuer à l'articulation avec les entrepôts et outils nationaux. Cette recommandation s'adresse à l'INSU et aux OSU.

- **Développer la place de la chimométrie**, notamment avec la croissance exponentielle de données et des capacités de calcul. Une réflexion importante doit être menée sur le recrutement de personnels dédiés permettant au domaine de se positionner comme un acteur incontournable sur ce thème. Les sections du CNRS, notamment la section 55, doivent être au cœur de cette politique de développement par des postes coloriés.

- **Favoriser les échanges et l'accès aux données d'autres organismes ou entreprises** en mettant en place des accords-cadres au niveau national. Par exemple, permettre l'accès aux données des acteurs tels que les gestionnaires des ressources en eau, en particulier dans le milieu urbain. La communauté pourrait bénéficier de la mise en place d'accords-cadres au niveau de l'INSU, voire du CNRS de manière plus globale.

# Continuum sciences-société et transdisciplinarité : coconstruction de la recherche-action pour accompagner la transition des territoires



# Les enjeux

Ce chapitre vise à reprendre les propositions de la communauté SIC pour répondre aux enjeux de transformation, de résilience (environnementale et écologique) et des conditions d'habitabilité des territoires, dans un contexte d'urgence de transformations majeures et systémiques. Elles s'appuient sur les réflexions et contributions des sciences humaines et sociales dans le contexte de cette prospective. Quatre enjeux majeurs ont ainsi été identifiés : i) complexité des socio-écosystèmes, ii) coconstruction de la recherche, iii) transition écologique et énergétique et iv) collecte, partage et exploitation des données et savoirs, au cœur de l'observation et de la compréhension des processus. Ces enjeux ont été discutés et concrétisés à l'aulne de plusieurs questions scientifiques clés pour la communauté : dérèglement climatique, perturbation des cycles biogéochimiques,

ressources en eau, changements d'usage des sols et érosion de la biodiversité. Les verrous identifiés, les opportunités et les recommandations concrètes pour la période à venir sont ensuite développés.

Les questions de recherche se situent à l'interface de plusieurs continuums : biotique/abiotique, terre/mer, surface/atmosphère, sciences/société, fondamental/appliqué. Cette synthèse s'inscrit dans la nécessité et l'urgence d'agir pour maintenir et adapter l'habitabilité des territoires. Il s'agit de produire une recherche utile à l'accompagnement des transitions socio-écologiques et énergétiques nécessaires. Cette recherche se positionne au carrefour de différentes savoirs et expertises pour une approche systémique et résolument inter- et transdisciplinaire des enjeux de soutenabilité.

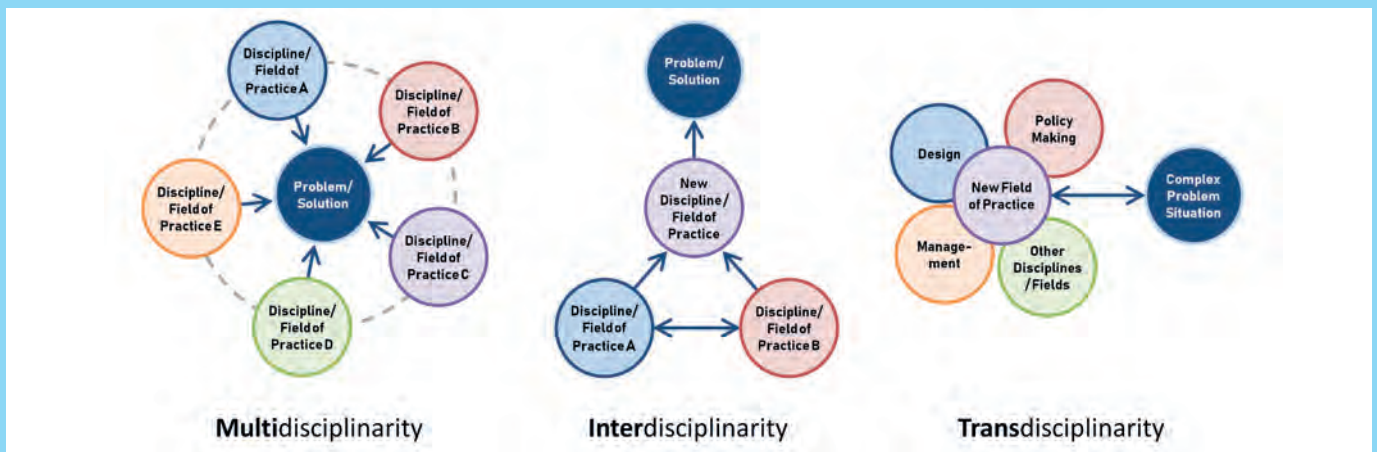


Figure 1. Dépasser les approches disciplinaires au service de la transition écologique, énergétique et systémique. Les définitions des termes multi, inter- et transdisciplinaire sont légion dans la littérature. La communauté SIC associe de nombreuses approches disciplinaires différentes, et à ce titre est multi et interdisciplinaire par défaut. Il s'agit désormais de développer des approches transdisciplinaires. Extraite de [https://timreview.ca/sites/default/files/article\\_PDF/Editorial\\_TIMReview\\_August2018.pdf](https://timreview.ca/sites/default/files/article_PDF/Editorial_TIMReview_August2018.pdf)

Concrètement, l'interdisciplinarité permet d'embrasser la complexité des socio-écosystèmes, et d'établir la confiance réciproque indispensable entre les acteurs de différentes disciplines afin de dépasser le cloisonnement disciplinaire (Figure 1). Il s'agit ainsi de mieux articuler la force des disciplines au sein de la communauté SIC pour mieux répondre à la complexité et à l'interdépendance croissantes des socio-écosystèmes (e.g. prise en compte des services écosystémiques ; mise en place de solutions fondées sur la nature ; concept One Health). En écho au bilan, il s'agit de poursuivre le développement de l'interdisciplinarité entre sciences biogéophysiques et

sciences humaines et sociales autour d'objets et de questions de recherche communes, tant les besoins d'analyse des jeux d'acteurs, des représentations et des biais cognitifs associés aux processus de décision sont aujourd'hui nécessaires.

L'approche transdisciplinaire, quant à elle, est cruciale pour coconstruire la recherche pour répondre aux enjeux d'habitabilité des territoires et permettre l'émergence et le partage de savoirs utiles et transformants pour préserver les ressources et les biens communs (Figure 1). Ceci implique d'intégrer explicitement différentes formes de savoir et d'expertise pour appréhender des

problèmes complexes et systémiques. Ceci permet de développer, à travers un processus itératif, de nouvelles approches de coconstruction des questions de recherche, de co-évaluation et de codissémination des résultats avec toutes les parties prenantes. Pour ce faire, développer et maintenir le dialogue avec toutes les parties prenantes sur le temps long est indispensable pour construire des relations de confiance mutuelle et permettre à la communauté SIC de mieux accompagner les territoires dans leurs transitions socio-écologiques et énergétiques, du diagnostic territorialisé aux scénarios prospectifs. De fait, le développement d'une telle approche transdisciplinaire permet l'implication et la participation de tous les acteurs et facilite l'appropriation et l'application de résultats de recherche par la société.

Par exemple, l'étude des cycles bio-géochimiques des éléments et des métaux stratégiques ou celle du cycle de l'eau invite au développement d'approches intégrées, tant du point de vue de l'impact environnemental (e.g. impact des activités humaines sur la biosphère en identifiant les sources de pollution pour les réduire), que de la diversité des processus abiotiques et biotiques impliqués. De manière plus générale, il s'agit de mieux prendre en compte et quantifier le rôle des écosystèmes dans la régulation des cycles de matière, qu'il s'agisse de l'eau, du carbone, des (micro)nutriments et des contaminants.

Sur ces problématiques, on retrouve les interfaces dans des environnements à des échelles très diverses (cf. chapitre « Intégration des différentes échelles d'espace et de temps dans l'étude des SIC » p. 50). De la même manière, les questions de productions d'énergie durable et renouvelable nécessitent des recherches aux interfaces (micro-)organismes-solution-minéraux (cf. chapitre « Stocks & Ressources naturelles » p. 60).

D'un point de vue plus opérationnel, la complexité et l'urgence des enjeux, la diversité des acteurs associés pose aujourd'hui la question de l'acquisition et du traitement des données de manière durable. À cet égard, la forte valeur ajoutée escomptée de l'interdisciplinarité et de la transdisciplinarité demande également de repenser la façon dont les bases de données sont conçues, mises en place, alimentées et exploitées, en particulier à la lumière des avancées de l'intelligence artificielle. Concrètement, il s'agit de mettre en œuvre des approches innovantes, et donc de nouveaux moyens, pour fédérer l'ensemble des acteurs impliqués dans les recherche-action inter- et transdisciplinaire. L'apport de nouvelles technologies dans la production, la spatialisation, le partage et l'utilisation de la donnée sont ici essentiels, tout comme le rôle des IR et SNO dans le partage et l'appropriation des données dans les territoires (cf. chapitre « Observons les observatoires » p. 98).

## Les questions scientifiques

La collaboration entre scientifiques et acteurs territoriaux est essentielle pour développer des solutions innovantes et adaptées aux contextes locaux (Figure 2). Pour cela, des connaissances plus développées semblent nécessaires pour bien comprendre les notions qui s'inscrivent dans le terme habitabilité et leurs relations. Celles-ci peuvent être l'adéquation et la valeur d'un habitat pour ses habitants au sens large dans un environnement spécifique au fil du temps. Ce peut être la combinaison des dimensions bio-géo-physico-chimiques, économiques, sociales, politiques, juridiques et de gouvernance soutenant la qualité des systèmes sociaux et écologiques pour l'ensemble des organismes vivants. Il s'agit de coconstruire des actions de recherche sur :

- l'habitabilité des territoires en lien avec le fonctionnement des systèmes socio-environnementaux (lien scientifique-société-décideurs) ;
- les enjeux de l'énergie, de la transition énergétique et l'impact de cette dernière sur l'habitabilité de la planète (extraction de matières premières, recyclage) ;
- la remédiation des milieux de vie en lien avec la connaissance de ces milieux ;
- le développement et la mise en œuvre de techniques, d'outils et de méthodologies variées, le traitement et la modélisation des données.

Sous l'effet du changement global lié au dérèglement climatique et à la perte de biodiversité, les territoires

connaissent une augmentation du niveau de risque environnemental qui suscite une attention croissante des populations et des gestionnaires. **Produire une science utile à tous les acteurs locaux nécessite de coconstruire et co-évaluer les services climatiques et écosystémiques de demain.** Ces services ont vocation à répondre pleinement aux enjeux d'anticipation, d'atténuation, d'adaptation et de transformation des socio-écosystèmes face aux effets des changements globaux. Les activités humaines perturbent les cycles biogéochimiques à l'échelle territoriale, accentuant les risques environnementaux. **Comprendre ces perturbations est crucial pour mettre en place des processus d'économie circulaire efficaces,** minimisant les impacts environnementaux et favorisant une gestion durable des ressources.

L'eau est indispensable à la vie et aux activités socio-économiques et représente à ce titre un **bien commun crucial**. Cependant, elle est fortement soumise aux forçages climatiques et anthropiques, notamment en raison des changements d'usage des sols. Les perturbations du cycle de l'eau altèrent le fonctionnement des socio-écosystèmes, tant au niveau écosystémique que pour les activités socio-économiques. La restauration des paysages hydriques et la modification des usages requièrent des approches intégrées des socio-hydrosystèmes, englobant la gouvernance, la gestion

des ressources en termes de qualité et de quantité, et les usages sobres et équitables dans le cadre du nexus Eau-Énergie-Agriculture (cf. chapitre « Stocks & Ressources naturelles »).

Les changements d'usage des sols, tels que l'urbanisation, l'artificialisation, l'agriculture et l'industrie, dégradent les sols et les milieux naturels. Les villes, en particulier, sont des territoires emblématiques du rapport homme-milieu allant des interactions climat-formes urbaines à l'échelle micro-locale aux impacts sur la santé humaine. Ceci souligne l'importance d'intégrer des pratiques durables dans la planification urbaine.

L'érosion de la biodiversité est un autre enjeu critique. L'approche One Health, qui lie la santé humaine à la santé environnementale, est essentielle pour modéliser les socio-écosystèmes et valoriser les services écosystémiques. La conservation et la restauration des milieux et de la biodiversité sont indispensables pour renforcer la résilience des socio-écosystèmes. Comprendre les déterminants environnementaux de la santé des socio-écosystèmes et les intégrer dans les politiques publiques est crucial pour assurer la durabilité et la qualité de vie des populations.

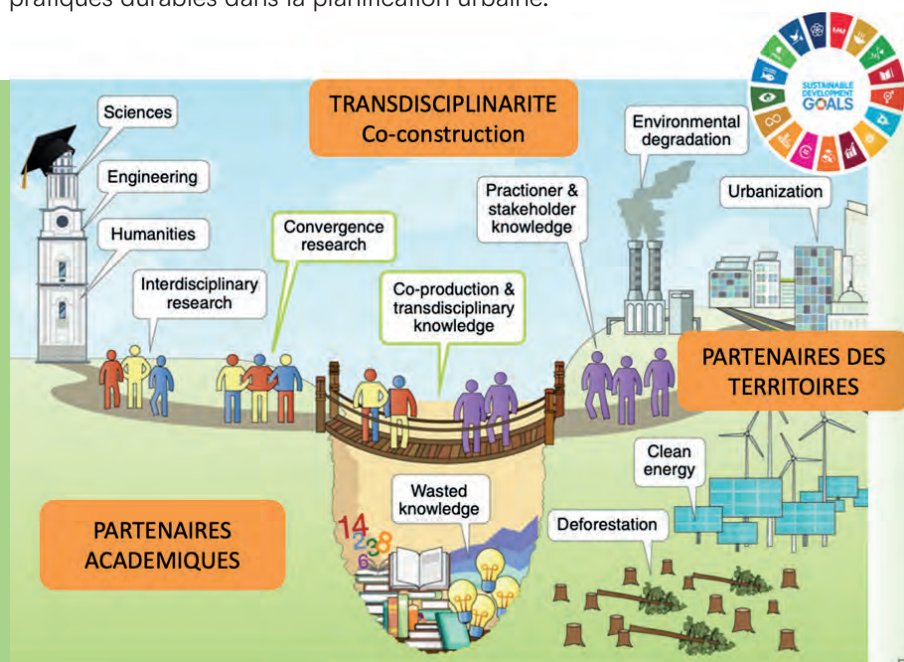


Figure 2. La nécessité d'une coconstruction transdisciplinaire des projets sur les questions scientifiques clés d'aujourd'hui. Tous les acteurs des territoires sont partenaires et ont vocation à contribuer à travailler ensemble sur les enjeux majeurs de la transition des socio-écosystèmes. Adapté de Irwin *et al.* (2018).

## Forces, verrous et opportunités

### Forces

Pour étudier la réponse des écosystèmes aux perturbations locales, ou à celles liées aux changements globaux, ou encore pour développer des biotechnologies fondées sur la nature, une plus grande pluridisciplinarité est indispensable entre hydrologues, géologues, géochimistes de l'environnement, bio-géo-chimistes, physico-chimistes des interfaces, écologues microbiens, écotoxicologues, etc. Cette pluridisciplinarité existe déjà dans la communauté SIC, et c'est une force qu'il faut faire grandir en allant plus loin dans l'intégration des disciplines. Cette intégration ne doit toutefois pas affaiblir le développement des compétences disciplinaires. Néanmoins, il est nécessaire de poursuivre le développement de travaux faisant interagir les sciences biogéophysiques avec les sciences économiques, humaines, sociales et juridiques à travers l'intervention de chercheurs disposant de compétences disciplinaires et d'autres travaillant déjà aux interfaces entre disciplines.

### Verrous et opportunités

#### Verrous scientifiques

Outre la nécessité de lever le cloisonnement disciplinaire, la recherche sur les SIC requiert le **couplage de modèles** basés sur des technologies très différentes, avec des temporalités et des ressources de développement variées. Ce couplage est indispensable pour saisir les dynamiques complexes et interconnectées des SIC. Toutefois, il pose des défis en termes de compatibilité et d'intégration des données, nécessitant des efforts concertés pour harmoniser ces modèles et maximiser leur utilité.

En outre, développer des démarches méthodologiques robustes pour mieux **prendre en compte l'incertitude** liée à la variabilité climatique naturelle est crucial, en particulier pour améliorer la précision des modèles et renforcer la fiabilité des prédictions, facilitant ainsi la prise de décision informée.

L'interdisciplinarité est essentielle pour une compréhension holistique des SIC. **Les sciences humaines et sociales apportent des données cruciales** pour comprendre les dynamiques sociétales et environnementales. **Mieux connaître ces données** pour les intégrer dans les recherches environnementales est fondamental pour une approche globale et efficace. La valorisation de l'interdisciplinarité permet d'enrichir les analyses et de proposer des solutions plus complètes et inclusives.

Enfin, les ZA, les SNO et les sites non labellisés jouent un rôle clé dans la mise en œuvre de l'interdisciplinarité. Ils servent de lieux d'expérimentation et d'observation, permettant de tester et d'affiner les modèles dans des contextes réels.

Pour lever ces verrous, les actions suivantes sont proposées :

- **Mise en place de Living Labs transdisciplinaires :** La création de « Living Labs » ouverts à la société civile (e.g. Vitirev dans le sud de Bordeaux ; des arbres et des hommes à Nancy) permet de développer une vision intégrée et renouvelée des ressources et des risques socio-écosystémiques. Ces laboratoires vivants favorisent la mutualisation des compétences et des connaissances scientifiques, expertes et locales, et facilitent l'ouverture à des disciplines comme la santé, le droit, la philosophie, les arts et les sciences politiques. Cette ouverture permet d'enrichir le dialogue et la compréhension collective des enjeux sociétaux et de mieux comprendre et orchestrer les transitions, qu'elles soient progressives ou accélérées. Une question clé revient de manière de plus en plus insistante : faut-il accompagner la transition actuelle ou susciter des transformations plus radicales ? Face à un consensus sur le réchauffement climatique mais aussi, à des divergences sur les solutions (d'adaptation et/ou d'atténuation), les « Living Labs » peuvent jouer un rôle crucial en facilitant une coconstruction locale adaptée aux contextes spécifiques et donc plus efficace.
- **Partage et appropriation des données :** La donnée est un point de rencontre entre la société civile et les chercheurs et sert d'interface entre les acteurs scientifiques et les gestionnaires. Son accessibilité ainsi que son utilisation appropriée restent des points d'attention. Pour maximiser leur utilisation, il est essentiel de perfectionner la précision des données et d'exploiter l'intelligence artificielle pour trier et analyser ces informations de manière stratégique et éclairée, facilitant ainsi leur intégration dans des processus décisionnels et des applications pratiques variées.
- **Rendre l'incertitude ludique :** Transformer l'incertitude en un aspect ludique et positif pour encourager l'engagement et la compréhension. Utiliser des outils pédagogiques et interactifs pour aider à visualiser et comprendre les marges d'erreur et les imprécisions inhérentes aux données.

### Interaction avec la société civile

Les transitions socio-environnementales et écologiques nécessitent une approche coconstruite avec les acteurs

du développement des territoires. Ces transitions, souvent qualifiées de « non transitions » dans le passé, représentent aujourd'hui une première tentative de changement profond. Il est donc impératif d'établir un **corpus de références et une méthodologie d'analyse pour guider ces processus**. Ceci inclut la documentation des expériences passées et la formulation de nouvelles approches basées sur la participation active de tous les acteurs concernés.

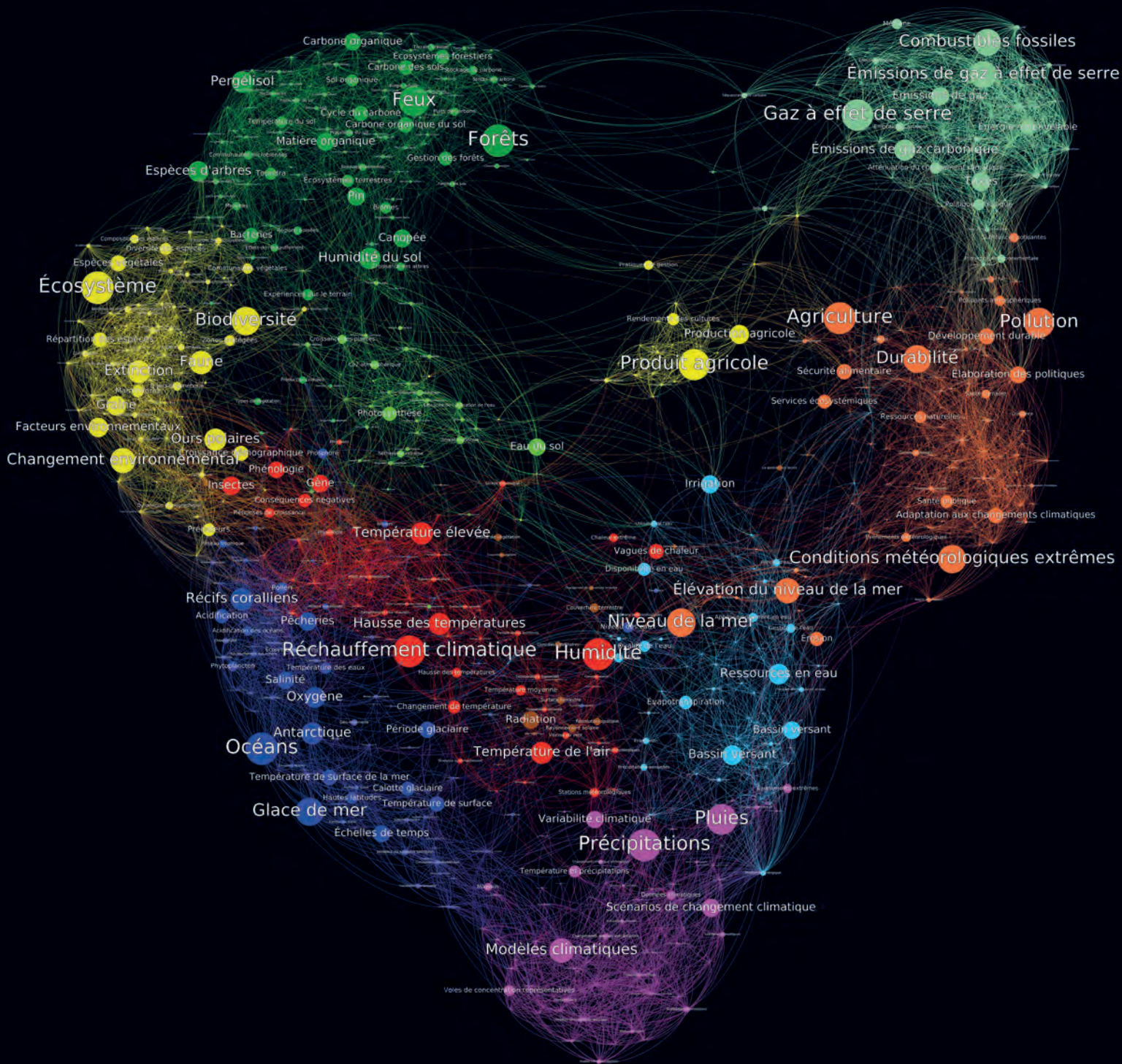
**L'identification des parties prenantes** est une étape fondamentale qui nécessite de clarifier qui est impliqué : collectivités territoriales, associations, industries, ou autres. Établir et maintenir des collaborations avec ces parties prenantes multiformes est crucial, car elles jouent un rôle clé dans la collecte de données, la mise en œuvre des sciences participatives et la coconstruction des solutions. Cette diversité d'acteurs enrichit le processus de transition et garantit que les solutions proposées soient adaptées aux réalités locales et intègrent les valeurs à défendre, telles que l'équité et l'éthique.

**Un lien solide avec le grand public** est également souhaité, mais nécessite de se positionner face à la désinformation et à la mauvaise utilisation des résultats scientifiques. Pour bien retranscrire les questionnements de la société et répondre adéquatement à leurs attentes, il est essentiel de développer des stratégies de communication claires et transparentes. Ceci permettra de renforcer la confiance du public dans les résultats scientifiques et d'assurer une plus grande participation des citoyens dans les processus de transition.

Enfin, il est important de reconnaître **le manque de temps des chercheurs et des parties prenantes** pour s'impliquer pleinement dans ces processus collaboratifs de moyen et longs termes. Pour surmonter ce défi, il pourrait être bénéfique de développer des structures frontières et des mécanismes facilitant l'interaction régulière entre les chercheurs et les parties prenantes. Ceci inclut l'organisation de forums de discussion, d'ateliers participatifs, et de plateformes de collaboration en ligne, les structures de transfert universitaire ou privé, permettant une communication continue et efficace.

Pour lever ces verrous, les actions suivantes sont proposées :

- **Résilience et collaboration :** Être résilient face au renouvellement des acteurs scientifiques et territoriaux et prendre en compte la diversité des objectifs et points de vue parfois opposés est crucial. En cassant l'image des scientifiques dans leur tour d'ivoire et en promouvant la diversité, l'égalité et l'inclusion, nous pouvons renforcer la confiance et la coopération avec la société civile.
- **Lutte contre la désinformation :** Une communication claire et précise est essentielle pour contrer la désinformation et la mauvaise utilisation des résultats scientifiques. En renforçant les interactions entre la science et la société, et en promouvant des valeurs de transparence et de rigueur, il est possible de construire une confiance mutuelle et de garantir que les transitions nécessaires vers un futur durable soient comprises et



Visualisation interactive des thèmes relatifs au changement climatique générée par le Tweetoscope climatique. Ce dispositif interactif vise à proposer une représentation graphique et évolutive des liens entre les travaux de recherche scientifique sur le climat et le traitement de ce sujet par les médias et le grand public. Il permet également de mettre en lumière l'articulation entre différents thèmes liés au changement climatique. L'équipe de l'ISC-PIF a analysé près de 30.000 publications scientifiques publiées dans les mois précédant la COP21 (2014-2015) et analyse en continu l'actualité Web depuis mai 2015 à travers les tweets collectés sur le réseau social Twitter. À partir d'une centaine de mots clés liés au changement climatique, en anglais et en français, les chercheurs ont collecté un corpus de tweets — actualisé en temps réel, qui comporte actuellement plus de 143 millions de tweets. Les pages web dont les liens figurent dans ces tweets ont également été crawlées et indexées. Ce projet participatif et évolutif s'enrichira en permanence des nouvelles recherches et des tweets analysés en temps réel.

© David CHAVALARIAS / Noé GAUMONT / Maziyar PANAHI / ISC-PIF / CAMS / CNRS Images

soutenues par tous.

- **Rôle des passeurs entre disciplines :** Les « passeurs » entre disciplines sont essentiels pour faciliter la communication et la collaboration interdisciplinaire. Ils aident à surmonter les barrières linguistiques et conceptuelles entre différents champs de recherche, garantissant ainsi que les perspectives et les connaissances de chaque discipline soient prises en compte et valorisées. Leur rôle est de promouvoir une intégration fluide des savoirs et des méthodes, enrichissant ainsi la qualité et l'impact de nos recherches et initiatives.

### Verrous institutionnels

Actuellement, il manque un suivi scientifique et institutionnel pour identifier et analyser les effets des transitions écologiques et énergétiques au sein de la société. Ce manque complique la tâche d'adaptation et d'anticipation face aux changements en cours. L'absence de structures dédiées à ce suivi entrave l'innovation et la mise en œuvre de réponses adaptées aux besoins réels des territoires et de leurs habitants.

Les collaborations entre la communauté académique et la société civile, même sans visée économique directe, restent insuffisamment développées, alors que des méthodologies existent pour évaluer les innovations, comme l'illustrent les expériences du CIRAD et de l'INRAe. Ces organismes ont mis en place des outils d'évaluation qui intègrent des dimensions sociales et environnementales, offrant ainsi un modèle à suivre pour d'autres institutions.

Pour lever ces verrous, les actions suivantes sont proposées :

- **Structures de transfert neutres et indépendantes et durables :** Pour assurer une gestion transparente et impartiale des données, il est impératif de mettre en place des structures de transfert neutres et indépendantes. Ces structures garantiront la crédibilité et la confiance dans l'utilisation des données, renforçant ainsi la collaboration entre tous les acteurs impliqués. Les IR et les SNO sont indispensables pour générer des connaissances applicables et directement utiles pour la gestion des ressources locales.

Stèle anthropomorphe située à Ulaan Uushig, des terres mongoles marquées par plus de 3 000 ans de nomadisme. Ce type de stèles, dites « pierres à cerfs », représentent des cervidés bondissants. Elles datent du début du 1er millénaire avant notre ère, elles sont associées à des sépultures et des tertres de pierres sous lesquels ont été déposées des têtes de chevaux. Elles permettent de mieux comprendre l'histoire du peuple de ces steppes. Ce complexe a été fouillé par la mission archéologique conjointe Monaco-Mongolie. Il a aussi fait l'objet d'un relevé photographique et photogrammétrique. La création d'un inventaire aussi précis que possible est la première étape du traitement stylistique des représentations rupestres. Le site d'Ulaan Uushig, d'une richesse exceptionnelle, est étudié par un groupe de recherche international et pluridisciplinaire dans le cadre de cette mission.

© Fabrice MONNA / MAP-MC / TRACES / ARTeHIS / CNRS Images



- **Sites Ateliers et solutions potentielles :** En développant des sites ateliers, les mairies et les communes peuvent exploiter la valeur touristique des aires protégées (e.g. en zone côtière, les aires marines). Cette coconstruction, appuyée par une volonté politique et scientifique de protection et de valorisation, permet non seulement de protéger les écosystèmes mais aussi de renforcer les économies locales.
- **Valorisation de l'engagement transdisciplinaire :** Le manque de ressources humaines qualifiées pour engager des recherches transdisciplinaires, particulièrement avec des chercheurs en SHS, nécessite une attention spécifique. Renforcer et encourager les démarches interdisciplinaires est essentiel pour répondre à la complexité des enjeux contemporains. Pour assurer des recherches transdisciplinaires de qualité et durables, il est impératif d'attirer les jeunes

chercheurs et de valoriser leur carrière. Ceci passe par la reconnaissance institutionnelle et la création de conditions favorables au développement de leurs compétences et de leur leadership et implique d'accepter et valoriser les actions avec et pour la société, même au prix d'une baisse de productivité telle qu'évaluée par les indicateurs bibliométriques (nombre de publications, h-index, etc.) Il s'agit également de repenser la notion d'excellence scientifique pour inclure l'inconfort et le manque de considération inhérents aux projets transdisciplinaires. Par ailleurs, en encourageant l'implication des acteurs non académiques avec une participation plus large et plus diversifiée dans la recherche, celle-ci s'enrichit de perspectives variées et pratiques, essentielles pour développer des solutions adaptées aux besoins réels de la société.

## Recommandations

### Éclaircir les concepts

Une définition précise du continuum Science-Société et une compréhension partagée de ce concept au sein de la communauté SIC sont essentielles. Il pourrait être intéressant d'inviter les SHS à contribuer à ce débat et d'utiliser les expériences transdisciplinaires comme objets d'étude pour une meilleure réflexivité.

Pour mieux intégrer les différents acteurs de la société dans une démarche de coconstruction, il s'agit d'encourager et de soutenir les projets de recherche-action et de renforcer la communication à travers des initiatives collaboratives (e.g. fresque du climat, fresque du sol impliquant les scientifiques, les collectivités, les décideurs, le grand public, les industriels, etc.).

### Formation

Plusieurs actions de formation initiale et continue pourraient être envisagées et sont à encourager (cf. chapitre « Formations — Métiers — Compétences » p. 132) :

- Créer et développer des cursus pluri- et transdisciplinaires centrés sur les thématiques environnementales, notamment pour former des passeurs entre disciplines.
- Utiliser des bourses comme CIFRE et les projets MITI SHS pour renforcer les liens avec les acteurs de la société civile.
- Augmenter la présence des non-académiques dans les universités pour diversifier les perspectives et enrichir les programmes de formation.
- Organiser des stages collectifs de 3<sup>e</sup> pour créer des passerelles vers les jeunes de tous les milieux, basés sur l'expérimentation et l'apprentissage.
- Former les scientifiques des SIC aux approches SHS et vice versa, pour une meilleure compréhension mutuelle

et collaboration.

- Former les scientifiques aux relations avec les médias et à la médiation scientifique. Les formations existent et de nombreux scientifiques les ont pratiquées. Il faut continuer à encourager les scientifiques à les suivre.
- Former les scientifiques aux méthodes d'intelligence collective pour améliorer les interactions entre scientifiques et avec les autres acteurs.
- Former les hauts fonctionnaires en s'appuyant sur des binômes de chercheurs de disciplines différentes (e.g. SHS et Sciences de la vie) qui sont sollicités par les représentants de l'état.
- Proposer des formations ayant pour objectif d'apporter aux journalistes les éléments de méthodologie et de contenus scientifiques leur permettant d'intégrer l'information climatique et environnementale dans le traitement de l'actualité selon l'exemple du Master ACCESS Climat et Médias.
- Intégrer des approches interdisciplinaires dans la formation des fonctionnaires *via* des visites de sites de recherche.
- Créer des lieux favorisant la transdisciplinarité, proches des objets de recherche et des acteurs concernés pour faciliter la collaboration ; par exemple, les Centres de Culture Scientifique, Technique et Industrielle (CCSTI) jouent un rôle crucial comme passerelles entre sciences et société, en impliquant activement les étudiants.
- Impliquer les citoyens dans les terrains d'étude, par exemple, *via* des initiatives de porte-à-porte.

### Références

- Irwin E.G., Culligan P.J., Fischer-Kowalski M., Lavander K., Murtugudde R., Pfirman S., 2018. Bridging barriers to advance global sustainability. *Nature Sustainability* 1, 324-326. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0085-1>

# Responsabilité environnementale de la recherche en SIC



# Les enjeux

Les demandes croissantes en énergie, en biens de consommation et en services de nos sociétés consuméristes sont responsables d'une sortie pour le système Terre de la stabilité environnementale de ces 10 000 dernières années (Holocène) durant lesquelles les civilisations humaines ont émergé. Cette dégradation de l'habitabilité de notre planète se traduit par le franchissement actuel de 6 des 9 frontières planétaires (Richardson *et al.*, 2023). Ce concept des frontières planétaires, enrichi du plancher social (Raworth, 2017), permet de définir un espace juste et sûr pour l'humanité. Cette méthodologie a notamment été utilisée par l'université de Lausanne pour définir sa stratégie de transition écologique (Gilloots *et al.*, 2023). Garantir un espace juste et sûr pour l'humanité implique nécessairement de diminuer nos impacts environnementaux et sociaux.

## Des questions de recherche en réponse aux crises environnementales

De par les objets qu'elle étudie, la communauté de recherches sur les surfaces et interfaces continentales (SIC) se considère et est traditionnellement perçue comme au cœur des enjeux environnementaux, qui s'agrègent, de façon systémique et transdisciplinaire dans cette notion d'habitabilité de la planète. La communauté SIC est bien outillée pour contribuer, en interaction avec d'autres disciplines, aux diagnostics de pertes d'habitabilité de la planète (notamment aux échelles locales *via* les observatoires), et identifier des leviers pour transformer, voire « réparer », les habitats, au sens large.

## Une responsabilité de transparence et d'exemplarité vis-à-vis de la société civile

Cette dimension politique des activités de la communauté SIC implique une responsabilité éthique vis-à-vis de la société civile, et en particulier des étudiantes et étudiants intéressés par la recherche. Pour que notre communauté ait un discours crédible sur les problématiques environnementales et ainsi accompagner les changements, elle doit faire preuve de transparence et d'exemplarité (Attari *et al.*, 2016 ; 2019) pour motiver les transformations aussi urgentes que délicates. Il faut également produire des éléments factuels pour contrer les allégations d'hypocrisie qui ont été formulées, notamment à l'encontre de collègues climatologues à cause de leur utilisation de l'avion (Higham & Font, 2019), pour ralentir la mise en place des transformations sociétales nécessaires pour garantir une Terre habitable.

Cependant, celles et ceux qui composent cette communauté questionnent rarement ouvertement les finalités, le sens ou les valeurs qui sous-tendent leurs travaux de recherche. Pourtant la communauté SIC pourrait être amenée à se demander si elle est une clé ou un verrou face aux crises environnementales.

Ce devoir de transparence et d'exemplarité requiert la connaissance de nos impacts environnementaux et sociaux. Cette étape est aussi nécessaire pour estimer la proportionnalité entre les impacts positifs et négatifs. Finalement, cette connaissance servira de base pour prioriser les mesures nécessaires à la limitation des impacts négatifs de nos activités et assurer le suivi de mesures d'évitement ou d'atténuation afin de développer des activités de recherches durables.

## Une empreinte environnementale liée à la conduite de nos métiers

Les impacts environnementaux et sociaux des recherches menées sur les SIC sont nombreux et sont liés, en grande partie, aux biens et services que nous utilisons pour nos recherches. Ils sont liés à l'exploitation des ressources, à la transformation des matières premières, à l'utilisation des produits et à leur gestion en fin de vie, ainsi qu'à nos déplacements. Parmi ces impacts nombreux, celui lié aux émissions de gaz à effet de serre (GES) est le plus avancé en matière de méthodes de quantification.

Les données collectées par le groupement de recherche Labos|point5 *via* son outil GES|point5 permet d'illustrer la trajectoire des émissions d'ici à 2030 en prenant comme point de départ l'empreinte carbone (EC) moyenne des laboratoires « ST3-2 - Terre Solide » selon la classification de l'HCERES. L'EC moyenne annuelle en poids équivalent CO<sub>2</sub> (eCO<sub>2</sub>) par équivalent temps plein (etp) sur la période 2019-2022 est de 4,5 ± 1,3 T eCO<sub>2</sub> / etp (5 laboratoires ; 10 bilans GES de 2019 à 2022). Elle est dominée par les achats de biens et de services qui représentent 42 ± 11 % et par les missions qui représentent 24 ± 14 % de l'EC totale (Figure 1).

Pour suivre le « Plan climat-biodiversité et transition écologique de l'Enseignement supérieur et de la Recherche » du ministère (MESR, 2022) et espérer maintenir le réchauffement climatique en dessous de 1,5 °C, cette EC doit être réduite de 55 % à l'horizon 2030 par rapport à 2019 pour atteindre la neutralité carbone en 2050. La Figure 1 illustre cette trajectoire basée sur une réduction annuelle de 5 % en prenant comme référence la moyenne des années 2019-2022 (Figure 1). En suivant cette trajectoire de réduction de 5 % par an à partir de 2022, à l'horizon 2030, l'EC annuelle de nos laboratoires devrait être autour de 3,0 T eCO<sub>2</sub> / etp, soit une baisse de 34 %. Pour atteindre la baisse de 55 %, il faudrait

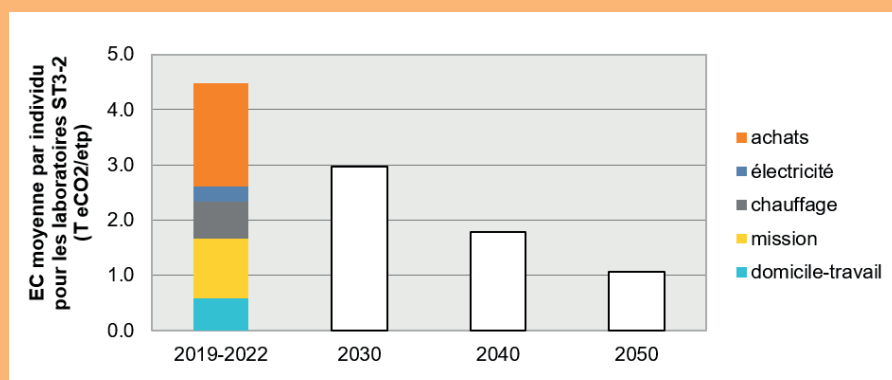


Figure 1. Ventilation de l'empreinte carbone (EC) moyenne annuelle par individu pour les 10 bilans GES de 5 laboratoires ST3-2 sur la période 2019-2022 (données GES|point5). L'EC est différenciée en 5 catégories : achats, électricité, chauffage, missions, et trajet domicile-travail. Les rectangles blancs indiquent la trajectoire de réduction moyenne selon les objectifs de 5 % du plan climat-biodiversité et transition écologique dans l'ESR aux horizons 2030, 2040 et 2050.

une baisse de 10 % par an à partir de 2024. Plus les années passent et plus la trajectoire de réduction aura une pente forte, rendant sa mise en place d'autant plus contraignante.

## Des évolutions à préparer

Dans ce contexte, il convient de conserver le sens de nos métiers tout en diminuant les impacts environnementaux des objets et des méthodes de recherche. Ceci implique des évolutions des métiers à mesure que les changements globaux s'intensifient. Ces évolutions se feront sous l'impulsion de la société et du politique ; ils auront des dynamiques ascendantes (depuis des collectifs de personnels de l'Enseignement Supérieur de la Recherche — ESR) et descendantes (depuis les tutelles et le ministère). Il est donc nécessaire de s'y préparer en amont afin de pouvoir continuer à produire et à diffuser de la connaissance et de limiter les tensions qui ne manqueront pas d'émerger. En effet, ces évolutions percutent parfois nos valeurs, nos idéaux et nos croyances, générant une dissonance cognitive croissante qui provoque une tension psychique désagréable à laquelle nous sommes tentés de répondre soit par un « engagement » pouvant bousculer les contours des institutions et des métiers de

la recherche (COMETS, 2023 ; Fragnière, 2024), soit, à l'inverse, en s'appropriant les arguments traditionnels de l'inaction climatique (Lamb *et al.*, 2020). À ces arguments s'ajoutent des arguments propres à la recherche scientifique : obsession des indicateurs chiffrés, peur de la bureaucratiation, neutralité et sacralisation de la science (Carbou & Sébastien, 2023). Comme pour l'ensemble de la société, ces évolutions nécessitent à la fois des mesures d'adaptation et des mesures d'atténuation.

## Un défi de transformation pour la communauté SIC

Accompagner les mutations de nos sociétés vers un mode de vie durable en développant une recherche durable représente le défi pour les années à venir pour l'ensemble de la communauté scientifique et spécifiquement pour la communauté SIC. Il s'agit de maintenir une activité pertinente, tant du point de vue de sa robustesse scientifique que des thématiques de recherche, tout en préservant le sens des recherches pour les actrices et acteurs de la communauté. Il est également nécessaire d'intégrer l'empreinte environnementale des travaux et leurs implications et pertinences dans une société bousculée par ces changements.

## Forces et opportunités

La prise en considération des impacts environnementaux des activités de recherche se structure à tous les échelons dans la communauté scientifique française et internationale. En France, elle s'organise dans les briques de base que sont les UMR (Unités Mixtes de Recherche) avec l'émergence de groupes de travail (GT) dédiés au développement durable et à la responsabilité sociétale. Les personnels impliqués dans ces GT, souvent isolés dans leurs UMR, se sont organisés à l'échelle nationale à travers le collectif Labos |point5 qui est devenu le GDR Labos |point5 soutenu par le CNRS, l'INRAe, l'ADEME,

l'INRIA et Sorbonne Université. Parmi les activités du GDR Labos |point5, plusieurs outils ont été développés pour quantifier l'EC des UMR, déterminer l'impact de mesures d'atténuation et mettre en réseau les laboratoires en transition.

À cette dynamique ascendante s'ajoute plusieurs dynamiques descendantes. Le comité d'éthique du CNRS, sur saisine du PDG du CNRS, a produit un avis soulignant que l'intégration des enjeux environnementaux à la conduite de la recherche relevait d'une responsabilité

éthique. Cette thématique figure aussi clairement à l'agenda politique à travers la Stratégie Nationale Bas Carbone et le plan d'action France Nation Verte. À l'échelle de l'ESR, cette dynamique nationale se traduit par le plan climat-biodiversité et transition écologique du MESR. De ce plan résultent des schémas directeurs Développement Durable et Responsabilité Sociale et Environnementale pour les établissements et organismes de l'ESR. Enfin, en janvier 2024, 16 organismes de recherche ont signé une déclaration d'engagement « pour être exemplaire dans l'application des objectifs de la planification écologique de l'État » et « mettre la recherche au service de la transition écologique et du développement soutenable » (MESR, 2024).

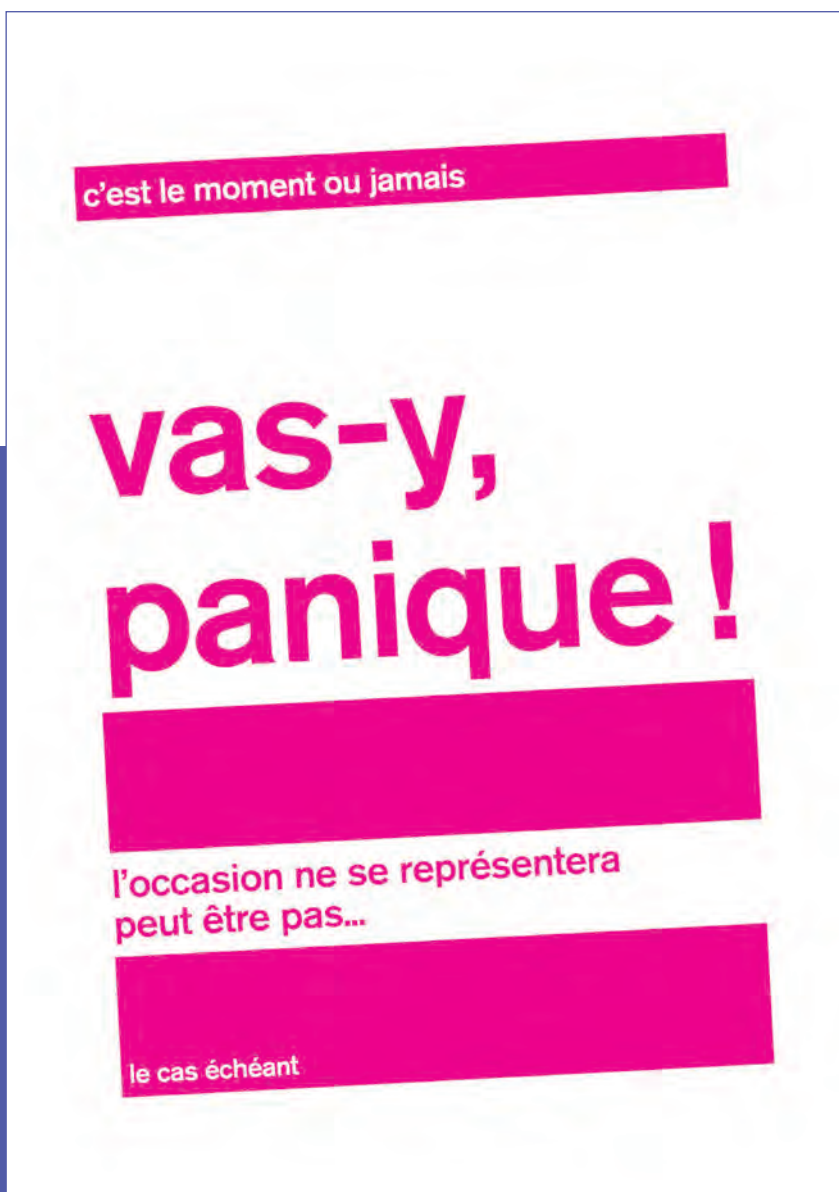
La situation actuelle est un point de convergence entre ces dynamiques ascendantes et descendantes. Elle représente une opportunité à saisir, mais aussi un risque car il va être nécessaire d'accompagner cette convergence pour éviter les pertes d'énergie, la fatigue, voire des situations d'épuisement professionnel liées

notamment à des différences de vocabulaire et de point de vue des acteurs mobilisés et à de possibles manques de considération pour le travail effectué par ces acteurs.

Une force pour notre communauté SIC réside dans le lien fort qui existe entre nos thématiques de recherche et les enjeux environnementaux. De par ses questions de recherche, notre communauté se positionne en sentinelle des impacts environnementaux. Il faudra veiller cependant à ce que cette force ne se transforme pas en faiblesse en nous encourageant sur la voie de la déresponsabilisation, qui est une stratégie connue de justification de l'inaction climatique.

Dans ces transitions vers une recherche durable, la communauté SIC va pouvoir compter sur ses capacités d'innovation et de création afin d'imaginer, de créer, d'expérimenter, etc. Elle pourra aussi compter sur sa dynamique pluri- et inter-disciplinaire qui se développe depuis plusieurs décennies autour des problématiques environnementales et qui sera nécessaire pour étudier les questions de manière systémique.

Enfin, la recherche française n'est ni isolée ni pionnière dans cette démarche de prise en compte des impacts environnementaux dans les activités de recherche. C'est une dynamique à l'échelle internationale qui est en train de se mettre en place, comme le montre le rapport « Objectifs et trajectoires bas-carbone dans l'ESR » produit en juin 2023 par le groupe de travail Scénarios du GDR Labos 1point5 (Ligozat *et al.*, 2023).



Création de l'artiste de StreeArt Cobie.  
© Cobie/Le cas échéant, 2023

# Stratégies

La stratégie pour répondre à ce défi doit se développer à plusieurs niveaux depuis les individus, les collectifs et jusqu'au système de recherche.

## Utiliser et développer les outils de suivi de l'empreinte environnementale

L'empreinte carbone des laboratoires SIC est la porte d'entrée la plus communément utilisée pour aborder et travailler la question de l'empreinte environnementale dans les unités. Elle commence à être connue grâce aux travaux de Labos 1point5, révélant la contribution importante des missions, des achats de consommables et de matériels (Mariette *et al.*, 2022), permettant ainsi de dessiner des axes de travail. Ces constats sont rendus possibles par des outils tels que GES 1point5 ou des recueils de bonnes pratiques en écoconception informatique (Bonamy *et al.*, 2022). Ces outils devraient être adaptés et popularisés auprès des porteurs de projets, afin de rendre routinier le calcul de l'impact d'un projet. Élargissant ce spectre d'évaluation « opérationnelle », il est urgent d'évaluer les différents types d'empreintes environnementales de nos activités, au delà des gaz à effet de serre, afin de déterminer les meilleures stratégies d'atténuation. Dans cette optique, l'utilisation de méthodologies comme l'analyse de cycle de vie pour des « systèmes » tels que les projets, les observatoires ou les infrastructures reste à développer. Cette évaluation est indispensable pour estimer le rapport entre impacts et retombées des activités. Ce type d'approche est en cours pour des instituts utilisant massivement la télédétection (Marc *et al.*, 2023), prenant exemple sur d'autres communautés : météorologie (Stevens *et al.*, 2021), astrophysique (Aujoux *et al.*, 2021, Knödseder, *et al.*, 2022) ou physique des particules (Bloom *et al.*, 2022). Ce genre d'approche permettrait aussi d'établir s'il existe une typologie d'empreinte environnementale en fonction des cœurs de métier des SIC et, le cas échéant, de proposer des actions ciblées de réduction d'empreinte. Le but ici n'est pas de comparer les disciplines mais de fournir les outils permettant d'identifier les mesures d'atténuation les plus pertinentes pour chacune d'entre elles. L'échelle d'application de ces suivis et mesures d'atténuation pourrait s'adapter selon l'objet : l'utilisation de quota (carbone ou distance) pour limiter l'empreinte carbone des déplacements peut se faire à l'échelle d'une équipe ou UMR (Ben Ari *et al.*, 2023), la coordination des groupements ou la limitation/mutualisation des achats serait probablement plus pertinente à l'échelle de thématiques ou d'IR telles que RéGEF (<https://www.ReGEF.fr/>).

## Se fixer des objectifs de réduction de l'empreinte environnementale

La mesure de l'empreinte carbone n'a de sens que si elle s'inscrit dans une trajectoire préalablement établie. Si les premières initiatives de suivi et de réduction de l'empreinte carbone ont été menées individuellement à l'échelle des UMR, il semble nécessaire que les tutelles fassent mieux connaître et fixent la trajectoire et les objectifs de réduction nationaux (Figure 1). L'avantage d'un objectif global de réduction, par exemple celui fixé par l'ESR de 5 % de GES par an, permet d'entraîner l'ensemble des UMR dans une dynamique commune, de matérialiser l'effort à fournir, et pouvoir adapter la stratégie en fonction de la trajectoire réalisée d'une année sur l'autre.

## Développer des méthodes de travail durables et sobres

Une forme de fuite en avant du travail de recherche consiste à multiplier les projets sans avoir le temps de traiter ou de valoriser l'ensemble des résultats obtenus. La quantité de données ouvertes est aussi en constante augmentation. Favoriser l'accessibilité de ces données ouvre des perspectives de recherche à partir d'analyses et d'observations existantes (cf. chapitre « Données en SIC » p. 104). Cependant la production, le stockage et la gestion de données toujours plus nombreuses ont un impact environnemental très important qui doit être aussi pris en considération. Lorsque l'acquisition ou la production de nouveaux résultats sont nécessaires, la conception des protocoles doit respecter une proportionnalité entre la précision du résultat recherché et les impacts environnementaux inhérents afin de les réduire, voire de les éviter. Le partage systématique de ces initiatives, *via* des communications, doit être valorisé pour permettre un essaimage dans la communauté. Le recours à des plateformes comme Transition 1point5 pour partager expériences et bonnes pratiques mises en place dans les laboratoires devrait se généraliser.

Une part importante (voire dominante) de l'empreinte de la recherche en SIC repose aussi sur l'achat des équipements (de Paepe *et al.*, 2023). Même si le calcul de l'empreinte carbone des achats mériterait d'être révisé (calcul basé uniquement sur la valeur d'achat du matériel et non de son impact carbone intrinsèque), la mise à disposition d'un inventaire national des équipements et moyens expérimentaux à différentes échelles, permettrait d'encourager la mutualisation et une optimisation des plans de charge. Des exemples existent déjà comme à l'Université de Lyon (<https://www.means.fr/fr/>), ou au sein l'IR RéGEF à l'échelle nationale. Il est aussi nécessaire de questionner les besoins de renouvellement en matériel,



Réunion du Conseil scientifique du Parc des Ecrins à Saint-Bonnet-en-Champsaur dans les Hautes-Alpes. Cette image a été réalisée dans le cadre d'un stage exploratoire dédié au bocage et aux canaux du Champsaur comme Solutions fondées sur la Nature. Ce sont des approches de protection, restauration ou gestion des écosystèmes permettant de relever efficacement différents défis sociétaux et ayant des impacts positifs à la fois sur le plan social, environnemental, économique et sur la biodiversité. Ces Solutions fondées sur la Nature sont étudiées par le living lab VIVALP. Elles sont appliquées aux socio-écosystèmes de la montagne, des vallées aux sommets, des zones habitées aux aires strictement protégées : le pays de la Meije, les Trois Vallées et le Champsaur. Le living lab VIVALP est porté par le programme national de recherche SoluBioD.  
© Camille MOREL / LECA / CNRS Images

informatique en particulier, souvent remplacés avant leur fin de vie, alors que la version « obsolète » suffit parfois à la majorité des applications auxquelles elle est dédiée. Lorsqu'une panne survient, en particulier pour des appareils ayant dépassé les dates de garanties, avec des frais de remise en état élevés, la réparation doit être envisagée grâce à l'existence de postes dédiés dans les laboratoires et la possibilité de s'appuyer sur un réseau de Fablab (<https://artsetmetiers.fr/fr/quest-ce-quun-fablab>), et grâce au partage d'instruments et de pièces d'occasion. Dans ce contexte, le principe des bourses aux matériels (par exemple du CNRS) doit être étendue. La nouvelle possibilité de prévoir des frais de maintenance dans les budgets des projets ANR est un plus. Il faut aller plus loin en intégrant également les frais de réparation.

Concernant les missions, la mutualisation des terrains d'étude est l'occasion de récolter des données ou des échantillons en minimisant le nombre de participants tout en s'ouvrant à l'interdisciplinarité (CNRS Écologie

& Environnement, prospective 2023). Coupler le terrain avec les conférences ou d'autres collaborations scientifiques, en planifiant des séjours plus longs, permettrait de maintenir les échanges scientifiques internationaux en réduisant les déplacements.

La mise en œuvre de ces mesures devrait permettre à la communauté d'effectuer une partie de la transition environnementale. Toutefois, les réductions nécessaires pour assurer le maintien de l'habitabilité de notre planète obligeront notre communauté à répondre à la question du maintien d'une production scientifique de qualité tout en diminuant le niveau d'activité (mesure de sobriété). Pour franchir ce cap, notre communauté devra identifier les systèmes de valeurs et/ou de croyances responsables des difficultés du passage à l'action. Des approches à la fois de sociologie, d'anthropologie et de psychologie, permettraient l'identification de nos biais comportementaux et offrirait ainsi la possibilité de développer des outils dédiés pour lever ces difficultés.

## Inclure de la réflexivité dans les activités de recherche

Les freins cognitifs justifiant l'inaction climatique dans la communauté scientifique sont similaires à ceux rencontrés dans la société civile. Notre communauté doit prendre conscience que la science et les techniques ne sont pas neutres. Comme les sciences humaines et sociales le démontrent depuis longtemps, la recherche scientifique s'inscrit dans les dynamiques sociales, économiques et éthiques de son époque (COMETS, 2023). Reconnaisant l'importance autant que l'insuffisance de la seule liberté académique comme garantie d'indépendance et d'éthique, il est particulièrement nécessaire dans la transition actuelle de se décentrer afin d'évaluer la proportionnalité entre les impacts des recherches et leurs retombées. Ceci demande le développement d'outils pour mesurer impacts et retombées, et de les confronter aux missions et statuts des établissements de l'ESR.

L'organisation d'ateliers collaboratifs au sein des différentes communautés permet de faire vivre ces questions (e.g. les réflexions menées au sein la communauté « modélisation des surfaces continentales ») et de réfléchir collectivement à la fois aux freins existants et aux moyens à mettre en œuvre pour répondre au challenge de la réduction des impacts environnementaux. Comme le souligne le COMETS (2022), ce défi concerne autant les objets de recherche que la manière dont la recherche est menée. En effet, les objets et thématiques de recherche doivent être évalués au regard des impacts environnementaux directs et issus de leurs potentielles retombées. Ces impacts diffèrent, par exemple, si la communauté se positionne en intendand qui contrôle les écosystèmes pour favoriser l'espèce humaine, ou bien si elle choisit d'accompagner les transitions de notre espèce pour favoriser l'ensemble du vivant (Wallenhorst & Theviot, 2020). De plus, au-delà des objets et des méthodes, il convient de questionner la construction philosophique de notre approche de la recherche scientifique. La recherche scientifique actuelle repose principalement sur une conception « mécaniste », « formaliste » ou « analytique » de la nature (Grothendieck, 1971), qui nécessite des approches quantitatives. Ces approches mériteraient d'être plus

souvent complétées par des approches descriptives (observation et description des comportements, caractéristiques et conditions). Penser la science d'une société en transition invite à libérer nos compétences d'innovation, de création en explorant toute la diversité des possibles.

## Repenser l'organisation de la recherche

Si l'ensemble des enjeux mentionnés dans les axes précédents doivent être favorisés au travers des profils de recrutement à tous les niveaux, leur prise en compte nécessiterait des changements dans l'organisation de la recherche.

Les verrous aux pratiques vertueuses se situent en effet pour beaucoup à ce niveau, notamment sur la perception d'une recherche de « qualité », trop souvent mesurée à l'aune des financements et qui s'engage donc dans une course perpétuelle au développement de nouveaux projets afin de répondre à des appels d'offres. L'amélioration continue de la qualité de la donnée ou du modèle est parfois devenue un champ de recherche en soi sans se préoccuper de la pertinence de ces optimisations pour les réponses aux problèmes étudiés. La course à la publication, depuis longtemps dénoncée, a jusque là favorisé une course à la quantité plutôt qu'à la qualité des résultats publiés (Paasche et Österblom, 2019), tout en rendant difficile la veille scientifique, en SIC (Tague & Brandt, 2023) comme ailleurs. Pourtant, il est maintenant acquis qu'il faut se libérer des critères quantitatifs, en respectant la déclaration de San Francisco sur l'évaluation de la recherche (<https://sfdora.org/read/>). L'évaluation des carrières des agents intègre désormais une meilleure prise en compte des aspects qualitatifs de l'ensemble des facettes du métiers de chercheurs (e.g. recrutements et promotions au comité national du CNRS), ou que l'impact environnemental des projets commence à être intégré dans les AAP des PN (EC2CO, IIT). Il est important d'encourager et de soutenir ces évolutions, et de continuer de se questionner collectivement et individuellement sur notre manière de percevoir la qualité de la recherche, tout en favorisant de manière structurée plus de coopération et de mutualisation.

## Trajectoires personnelles et professionnelles

La recherche scientifique en général et donc la communauté SIC est confrontée à un problème systémique. Elle est en interaction directe avec le monde socio-économique et la manière dont les nouvelles connaissances sont créées dépend du niveau de dépenses énergétiques et d'impacts environnementaux de ce monde. La recherche sur les SIC s'est construite sur un contexte d'abondance toujours croissante de ressources et d'énergie. Les transitions sociétales nécessaires pour garantir des conditions de vie favorables

à notre espèce, et aux autres, impliquent des transitions dans nos manières de travailler. Cette démarche de transition a plusieurs externalités.

Il existe une tension entre les valeurs/croyances de notre système de recherche et les enjeux environnementaux, que ce soit à travers le sentiment d'éco-anxiété ou bien via la perte de sens et l'impression de ne pas faire son travail correctement. Cherchant du sens dans leur travail, les collègues de la communauté SIC peuvent être amenés

Vérification de la microturbine fournissant l'énergie à la station des Nouragues, Guyane. La fourniture en énergie à la station des Nouragues, située au cœur de la réserve naturelle, est réalisée à l'aide d'un dispositif renouvelable et non polluant.  
© Claude DELHAYE / CNRS Images



à faire évoluer leurs pratiques et/ou thématiques de recherche, voire dans certains cas à vouloir changer de carrière. Il est important de créer les conditions favorables à l'accompagnement de l'ensemble des personnels dans ces démarches d'évolution de carrière, au niveau des communautés de recherche et des tutelles.

La démarche de transition écologique est un chemin dont on connaît le point de départ mais pas le point d'arrivée, ce qui est de nature à générer de l'anxiété. Il

nous faut oser aller vers l'inconnu. C'est une démarche familière côté scientifique, mais beaucoup moins d'un point de vue organisationnel et culturel. Ceci implique d'admettre que dans ce temps de transition, la capacité des personnes à générer des connaissances peut être impactée. Il est important de donner envie de faire ce chemin, par exemple à travers des ateliers collectifs, pour réfléchir à ce vers quoi la communauté a envie d'aller. Cela s'inscrirait dans un effort nécessaire pour créer des conditions d'exercice de la recherche favorables à toute la

diversité d'initiative pour imaginer les façons de générer de la connaissance compatible avec une société ayant fait ses transitions.

Chemin faisant, la démarche de transition va créer des nouveaux besoins en compétences, que ce soit d'un point de vue technique pour améliorer la maintenance et la réparabilité des outils, d'un point de vue organisation et animation de la recherche ou encore du point de vue des méthodes de travail. Il est ainsi important de former les personnels désireux d'adapter leurs pratiques aux enjeux environnementaux et de recruter des personnels ayant

ces compétences.

Enfin, la démarche de transition vers une recherche durable sur les SIC doit se nourrir d'un ensemble d'expérimentations. Il est ainsi nécessaire de favoriser leurs émergences à travers la reconnaissance institutionnelle de l'implication des différentes catégories de personnels dans ces expérimentations et ces nouvelles manières de faire. Cela doit se décliner concrètement à travers la valorisation de ces implications dans les évaluations ainsi que de leur prise en compte explicite dans les recrutements.

## Recommandations

### Besoin de trajectoires de réduction d'empreinte et d'accompagnement de la part des tutelles

- Définir clairement des objectifs ambitieux de réduction des impacts environnementaux de la recherche, au minimum à la hauteur des exigences imposées par l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 concernant les gaz à effet de serre. **Ces objectifs explicites doivent être accompagnés de trajectoires et d'outils d'aide** à leur mise en place, en privilégiant les solutions open source tels que les outils déjà développés par les collectifs comme Labos 1point5.
- **Mettre en commun** les outils et les objectifs et les décliner sur les différentes strates organisationnelles : organismes, instituts, infrastructures, laboratoires, projets, etc.
- **Recruter des personnels** pour améliorer les outils de diagnostic et les mettre en œuvre. Ces recrutements pourraient se faire à l'échelle des OSU. Il sera tout de même nécessaire d'avoir des personnels connaissant le milieu de la recherche scientifique pour éviter des phénomènes de rejet dus à des personnels qui pourraient être perçus comme « hors-sol ».

### Besoin de réflexion sur les règles et l'orientation des financements

- Alimenter la dynamique d'innovation avec ce qui se passe en dehors du monde de la recherche, par exemple à travers des mécanismes et un fléchage d'une partie des financements de la recherche vers des thématiques coconstruites par et pour la société civile (e.g. proposition du projet collectif Horizon Terre pour que 10% du budget recherche soit fléché par des conventions citoyennes (<https://horizon-terre.org/ht/>)).
- Promouvoir une recherche frugale au travers des sources et organismes de financement. Cela pourrait se traduire par la demande systématique d'une description

de l'impact environnemental du projet dans les AAP.

- Définir un cadre réflexif et éthique intégrant l'ensemble des parties prenantes pour les financements et partenariats de recherche avec les acteurs socio-économiques.
- Le modèle actuel de la recherche sur financement par appels d'offre compétitifs est un modèle pouvant favoriser la consommation de ressources. Une partie plus importante des financements pourrait être allouée selon des modes de répartition basés sur des critères de sobriété et de mutualisation.
- Une telle répartition est nécessaire au développement de dynamiques coopératives. Le rôle central des IR doit être maintenu voire amplifié, tant pour la mutualisation des sites et observatoires que pour la mutualisation des moyens analytiques.

### Besoin de sécuriser le cadre de travail

- Favoriser l'émergence d'expérimentations pour développer une recherche durable sur les SIC, depuis les étapes de réflexion (ateliers, groupes de travail transdisciplinaire) jusqu'à la mise en application. Le défi de créer de la connaissance tout en consommant moins de matière et d'énergie dans un modèle de société durable n'est pas encore suffisamment encouragé dans notre système actuel.
- Maintenir la liberté académique tout en créant le cadre commun de la nécessaire diminution des impacts environnementaux de nos recherches.
- Former tous les personnels de la recherche aux enjeux environnementaux de leur activité, à l'aune de la formation des hauts fonctionnaires. L'identification de ces enjeux et des stratégies pour y répondre peuvent être organisées à différentes échelles depuis les laboratoires jusqu'aux communautés thématiques et disciplinaires. La communauté SIC se doit d'être pro active dans la formation de ces agents et dans la communication autour de ces enjeux.

• Reconnaître que ces mutations vont demander du temps au niveau individuel et collectif. Ce temps ne sera pas linéaire, les transitions dans la communauté évolueront lentement avec l'augmentation du nombre de collègues s'y engageant jusqu'à un point de bascule. Il est donc important de sécuriser ces initiatives tant dans les évaluations que dans les financements et de réfléchir dès aujourd'hui à l'accompagnement de la communauté SIC au long de ce processus.

## Références

- Attari S.Z., Krantz D.H., Weber E.U., 2016. *Statements about climate researchers' carbon footprints affect their credibility and the impact of their advice*. *Climatic Change* 138, 325–338. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1713-2>
- Attari S.Z., Krantz D.H., Weber E.U., 2019. *Climate change communicators' carbon footprints affect their audience's policy support*. *Climatic Change* 154, 529–545. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02463-0>,
- Aujoux C., Kotera K., Blanchard O., 2021. *Estimating the carbon footprint of the GRAND project, a multi-decade astrophysics experiment*. *Astroparticle Physics*, 131, 102587. <https://hal.science/hal-03228304/document>
- Ben Ari T., Lefort G., Mariette J., et al., 2023. *Flight Quotas Hold the Most Significant Potential for Reducing Carbon Emissions from Academic Travel*. *EarthArXiv preprint*. <https://doi.org/10.31223/X5WD5H>
- Bloom K., Boisvert V., Britzger D., et al., 2022. *Climate impacts of particle physics*. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2203.12389>
- Bonamy C., Boudinet C., Bourgès L., et al., 2022. *Je code : les bonnes pratiques en éco-conception de service numérique à destination des développeurs de logiciels*. pp.1-19. <https://hal.science/hal-03009741v5/document>
- Carbou G. & Sébastien L., 2023. *Les discours d'inaction climatique dans la communauté scientifique*, *Écologie & politique*, 2023/2 (N° 67), p. 71-91. <https://www.cairn.info/revue-ecologie-et-politique-2023-2-page-71.htm>
- CNRS *Écologie & Environnement* (2023). *Prospective 2023*, <https://www.inee.cnrs.fr/fr/prospectives-cnrs-ecologie-environnement-2023>
- COMETS, 2022. *Intégrer les enjeux environnementaux à la conduite de la recherche — Une responsabilité éthique*, *Avis n°2022-43*, <https://comite-ethique.cnrs.fr/>
- COMETS, 2023. *Entre liberté et responsabilité : l'engagement public des chercheurs et chercheuses*, *Avis n°2023-44*, <https://comite-ethique.cnrs.fr/>
- De Paepe M., Jeanneau L., Mariette J., et al., 2023. *Purchases dominate the carbon footprint of research laboratories*. *bioRxiv*, 2023-04. <https://doi.org/10.1101/2023.04.04.535626>
- Fragnière A., 2024. *Exploring key issues in public engagement and activism. Findings of a working group at the University of Lausanne.*, *EGU General Assembly 2024*, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-16862. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-16862>
- Gilloots C., Matasci C., Dupoirier S., Recordon J., Meillard J., 2023. *Le Donut de l'UNIL : un outil de navigation pour la transition écologique et sociale*. Université de Lausanne, Suisse. <https://www.unil.ch/files/live/sites/durable/files/donut-unil>
- Grothendieck A., 1971. *La nouvelle église universelle*. *Survivre... et vivre*, août-septembre 1971, n°9.
- Higham J. & Font X., 2020. *Decarbonising academia : confronting our climate hypocrisy*. *Journal of Sustainable Tourism* 28, 1-9. <https://doi.org/10.1080/09669582.2019.1695132>
- Knödseder J., Brau-Nogué S., Coriat M., et al., 2022. *Estimate of the carbon footprint of astronomical research infrastructures*. *Nature Astronomy* 6, 503–513. <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01612-3>
- Lamb W. F., Mattioli G., Levi S., et al., 2020. *Discourses of climate delay*. *Global Sustainability*, 3, e17, <https://doi.org/10.1017/sus.2020.13>
- Ligozat A.L., Brun C., Demirdjian B., et al., 2023. *Objectifs et trajectoires bas-carbone dans l'ESR*. *Labos 1point5*. 2023 pp.1-33. <https://hal.science/hal-04177415>
- Marc O., Biancamaria S., Derrien S., et al., 2023. *The share of research infrastructure in comprehensive greenhouse gas budget for five French Earth and Space Science laboratories*, *EGU General Assembly 2023*, Vienna, Austria, 23–28 Apr 2023, EGU23-8402. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-8402>
- Mariette J., Blanchard O., Berné O., et al., 2022. *An open-source tool to assess the carbon footprint of research*. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 2, 035008. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac84a4>
- MESR, 2022. *Plan d'action Climat-Biodiversité pour l'Enseignement supérieur et la Recherche au service de la transition écologique* Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Novembre 2022. <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/plan-climat-biodiversite-et-transition-ecologique-de-l-enseignement-superieur-et-de-la-recherche-91292>
- MESR, 2024. <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/sites/default/files/2024-01/d-claration-commune-des-dirigeants-onr-pdf-31422.pdf>
- Paasche O. & Österblom H., 2019. *Unsustainable Science*. *One Earth* 1, 39-42. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.08.011>
- Raworth K., 2017. *A Doughnut for the Anthropocene: humanity's compass in the 21st century*. *The Lancet Planetary Health*, Volume 1, Issue 2, e48 — e49. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(17\)30028-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30028-1)
- Richardson K., Steffen W., Lucht W. et al., 2023. *Earth beyond six of nine planetary boundaries*. *Science Advances*, 9, eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>
- Stevens B., Bony S., Farrell D., et al., 2021. *EUREC4A*, *Earth System Science Data*, 13, 4067–4119. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4067-2021>
- Tague C. & Brandt W.T., 2023. *Critical zone science in the Western US—Too much information?*. *Frontiers in Water* 5: 1226612. <https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1226612>
- Wallenhorst N. & Theviot A., 2020. *Les récits politiques de l'Anthropocène*. *Raisons Politiques*, 2020/1 (N°77), p. 5-34. URL : <https://www.cairn.info/revue-raisons-politiques-2020-1-page-5.htm>

# Formations – métiers – compétences



Pour répondre aux enjeux d'un écosystème de la recherche et d'un monde socio-économique en constante et rapide évolution, et proposer des solutions durables pour réussir les transitions nécessaires vers une société soutenable dans les domaines du climat, de l'environnement, de l'énergie et de l'alimentation, les connaissances acquises au travers des recherches en SIC sont un atout majeur. Elles se situent au cœur des problématiques générées par une pression croissante sur les milieux, l'effondrement de la biodiversité et les changements climatiques. Les SIC doivent s'adapter, en termes de compétences et de formation académique, avec la création de nouveaux cursus, tant pour les formations initiales que continues, pour accompagner non seulement l'évolution des recherches, mais aussi la création des métiers de demain, indispensables pour atteindre les objectifs du développement durable définis par l'ONU en 2015.

Dans le domaine de la recherche scientifique, la consolidation des observatoires *in situ*, en tant que pilier de la recherche environnementale, conduit à la production massive de données sur diverses variables. L'analyse et le traitement de ces données permettent d'améliorer la compréhension des processus environnementaux et la modélisation de leur évolution. Ceci exige le développement de nouveaux outils et méthodologies, tout en impliquant une évolution des formations (universités, grandes écoles), des compétences et des métiers, pour répondre aux besoins sociétaux et construire une recherche fondamentale ancrant les racines d'une recherche finalisée. Cependant, ces nouveaux besoins en compétences ne doivent pas faire oublier les disciplines fondamentales sur lesquelles reposent les sciences environnementales. Alors qu'elle était encore peu valorisée il y a une dizaine d'années, l'interdisciplinarité est devenue, depuis le dernier exercice de prospectives, et plus encore aujourd'hui, un élément central de nombreux projets, en tant que moyen indispensable pour obtenir une vision holistique du fonctionnement de l'environnement et inscrire la recherche SIC en sciences de la durabilité.

## Besoins pour la recherche

### Des besoins multiples

Les besoins en compétences, formation et ressources humaines, identifiés par la communauté pour l'avancement de la recherche en SIC dans les années à venir, se déclinent en quatre grands thèmes : le **renforcement des approches interdisciplinaires**, l'acquisition de nouvelles compétences dans le domaine de la **science des données**, la **médiation scientifique** et la **science participative**. Nous pouvons par ailleurs distinguer les besoins en compétences spécifiques aux champs disciplinaires des SIC de ceux relevant davantage d'interactions avec d'autres disciplines scientifiques, parfois éloignées des sciences de l'environnement (e.g. intégration des dernières avancées en matière d'outils numériques ou analytiques). En fonction des **besoins exprimés en compétences et en ressources humaines**, il faudra adapter ou créer de **nouvelles formations**, et, dans certain cas, rétablir des formations disciplinaires qui ont été négligées au cours des dernières années (voire décennies), comme précisé ci-après.

Des compétences utilisées récemment dans la communauté SIC, telles que l'application des méthodes omiques ou l'étude de l'ADNe, deviennent désormais incontournables **et seront durables dans les années à venir**. Ces **besoins émergents** viennent s'ajouter aux compétences que la communauté identifie comme indispensables pour assurer la continuité des missions phares de ses unités de recherche : acquisition de données et maintenance des observatoires (incluant la curation des données), étude de la matière organique, interactions entre le vivant et le minéral, ou encore modélisation numérique intégrant le forçage anthropique, etc. Parallèlement, il est urgent de retrouver des compétences qui, bien que cruciales, sont en déclin, comme la palynologie, la pédologie, ou la pétrographie organique, et de les moderniser en utilisant des méthodes d'investigation plus récentes permettant d'aller plus loin dans l'identification des processus prévalents et/ou la caractérisation des matériaux ou des proxies (automatisation, création de banques de données, exploitation de ces données par IA, etc.).

## Un besoin toujours prégnant d'interdisciplinarité

Le fort besoin d'interdisciplinarité a été relevé tout au long du processus d'élaboration de ces prospectives. Le précédent exercice de prospective avait déjà insisté sur le besoin de développer des compétences d'interfaces, ainsi que la nécessité de formation et de ressources humaines associées (cf. chapitre « Bilan de la dernière prospective » p. 12). L'interdisciplinarité peut se concevoir entre différentes sciences biogéophysiques et entre sciences biogéophysiques et sciences humaines et sociales. Dans le premier cas, elle s'impose en raison de

la nature intrinsèquement complexe des problématiques environnementales, où les processus physiques, chimiques et biologiques sont fortement intriqués dans le temps et l'espace. Dans le second cas, la question porte sur les interactions entre l'évolution des milieux naturels et celle des sociétés humaines : impacts des activités humaines sur les écosystèmes, développement d'outils et de modèles technico-économiques adaptés à la gestion des territoires ou des filières à différentes échéances.

La question se pose de savoir si les chercheurs SIC doivent, lorsque c'est possible et pertinent, s'appropriier l'utilisation des outils d'autres disciplines, ou s'il est préférable de développer des collaborations avec des

Tri manuel de blocs de sol dans le cadre d'une formation aux protocoles de prélèvements de vers de terre, sur des terrains expérimentaux de la station biologique de Paimpont (Université de Rennes 1), en Ille-et-Vilaine. Les scientifiques de la plateforme EcoBioSoil y forment des stagiaires et contractuels qui iront ensuite sur le terrain à travers toute la France pour récolter des échantillons. Les prélèvements s'effectuent selon des protocoles standardisés pour obtenir de nouvelles données de biodiversité lombricienne dans différentes occupations et modes de gestion des sols. EcoBioSoil est une plateforme collaborative du laboratoire Ecobio qui propose à la fois des protocoles participatifs d'observation de la biodiversité lombricienne (dans le cadre de l'Observatoire participatif des vers de terre - OPVT) et qui intervient dans des programmes de recherche comme référence nationale et internationale pour les lombriciens.

© Jean-Claude MOSCHETTI / ECOBIO / CNRS Images



spécialiste de ces disciplines sans nécessairement maîtriser ces outils en interne. Les deux pratiques coexistent dans la communauté SIC et doivent continuer à exister en fonction des besoins.

La Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires (MITI) du CNRS apparaît comme un levier pertinent pour encourager les initiatives interdisciplinaires, avec un accroissement du nombre de programmes spécifiques. Le « décloisonnement » des observatoires, en adoptant une approche moins sectorielle et plus inter-domaines ou inter-instituts est également évoqué. La création de nouveaux Masters interdisciplinaires (e.g. Sciences Politiques/Sciences de la Terre, Environnement/Droit, etc.) est nécessaire, bien que des interrogations subsistent quant aux débouchés professionnels. Le faible nombre de postes ouverts au concours au CNRS dans les sections dédiées (e.g. CID 52) et la difficulté à valider des profils réellement interdisciplinaires dans l'enseignement supérieur sont des obstacles majeurs à l'amélioration des capacités interdisciplinaire dans la recherche SIC. Les sciences de la durabilité, au cœur de l'inter- et la transdisciplinarité autour d'enjeux de la soutenabilité des sociétés, couvrent une grande diversité de disciplines. Des formations spécifiques à la science de la durabilité sont impératives pour répondre aux enjeux de la dynamique des socio-écosystèmes en matière d'environnement, sociologie, économie, droit, etc. Ces formations permettent aussi de poser de nouveaux questionnements scientifiques propres aux SIC.

Au niveau doctoral, la formation à une discipline secondaire permettrait de dépasser la simple sensibilisation à l'interdisciplinarité et de favoriser une montée en compétences transversales, même si cela allongerait la durée des thèses.

## La science des données et l'intelligence artificielle en renfort des recherches en SIC

Dans un contexte où l'observation génère des volumes de données non seulement considérables mais aussi très diverses, il convient de souligner que le besoin d'une montée en compétence en analyse de données et en traitement de l'information avait déjà été mentionné dans la prospective précédente, afin de « ne pas rater la transition vers le « big data » (cf. chapitre « Données en SIC » p. 104). Bien que les objectifs et les modalités d'intégration des méthodologies de la Science des Données varient en fonction des thématiques de recherche ou des questions scientifiques posées, le besoin de formation ou de renforcement des compétences dans ce domaine apparaît désormais indispensable. Dans le cas spécifique de la Science des Données, et comme cela a été évoqué précédemment pour le renforcement de l'interdisciplinarité, des interrogations subsistent quant au degré d'investissement ou de maîtrise des outils nécessaires à une intégration

optimale des méthodologies d'analyse de données et de l'intelligence artificielle (IA) par les chercheurs SIC. Faut-il privilégier le développement de collaborations avec les spécialistes de ces disciplines, même s'ils ne disposent d'aucune expertise des SIC, ou bien les chercheurs SIC doivent-ils s'approprier dans une certaine mesure les outils de l'IA pour répondre à leurs questions de recherche ? Si cette réflexion pose la question plus généralement la question du degré d'interpénétration des savoirs disciplinaires, le cas de l'IA ou de la Science des Données en général ne devrait pourtant pas être fondamentalement différent de celui des techniques mathématiques ou numériques nécessaires à la modélisation en SIC. En tant qu'approches non centrées sur la représentation de mécanismes (physiques, chimiques, biologiques, mais aussi spécifiques aux SHS), mais permettant le traitement de problèmes complexes en exploitant les données issues de différentes disciplines, les méthodologies de l'IA pourraient également contribuer à promouvoir et favoriser les démarches interdisciplinaires. Il semble donc recommandé d'intégrer des connaissances de base sur l'IA et la Science des Données et de les appliquer aux SIC, sans que cela n'exclue pour autant l'établissement de collaborations avec des spécialistes lorsque ceci est nécessaire.

## La science participative

Les démarches de science participative ont, en partie, pour objectif de transférer les résultats de la recherche et de sensibiliser la société civile aux problématiques environnementales. Elles permettent également à la communauté scientifique de développer de nouvelles perspectives pour enrichir et partager notre mission d'observation avec les citoyens. En outre, cette démarche peut, dans une certaine mesure, compléter les moyens d'observation, en densifiant les observations, par exemple, voire de compenser la réduction des dispositifs existants. Déjà pratiquée dans certains observatoires et les zones ateliers, ces démarches ont permis de densifier les mesures, temporellement et spatialement, notamment dans des régions peu couvertes ou difficilement accessibles. Les sciences participatives occupent ainsi une place croissante dans les pratiques de la recherche. Ouvrir les observatoires et les campus au grand public, impliquer les citoyens sur les terrains d'étude, proposer des accès ludiques et pédagogiques aux mesures des observatoires, ou encore créer des jumelages entre observatoires avec établissements scolaires (écoles/ collèges/ lycées) sont des moyens évoqués.

La production commune de connaissances scientifiques à travers les pratiques participatives, impliquant une diversité d'acteurs, nécessite une démarche inclusive et des interactions efficaces entre chercheurs et société civile. Cela requiert une formation spécifique pour les chercheurs investis dans ce type de démarche.

Dans ce contexte, l'utilisation des outils de l'IA par la communauté pourrait permettre de mieux exploiter l'information issue des observations participatives.

Cependant, l'intégration de ces données « non-académiques » pourrait nécessiter, en amont, le développement d'outils numériques de traitement par la communauté scientifique spécialisée avant de pouvoir les intégrer pleinement dans les travaux des SIC.

Un obstacle majeur à l'implication des chercheurs dans les sciences participatives réside dans le fait que, malgré les encouragements (ou parfois les obligations, comme les activités CSTI parfois imposées aux doctorants), l'investissement nécessaire pour mettre en place ces actions est considérable, et n'est pas toujours pris en compte dans l'évaluation de leur activité scientifique,

qui reste principalement basée sur la productivité académique. Le développement de la science participative doit donc être encouragé, mais la charge qu'elle représente pour les scientifiques doit être prise en compte. Il est essentiel d'accompagner ce développement par le de recrutements de spécialistes (e.g. community managers) pour aider les équipes à mettre en place et à suivre ces initiatives dans les laboratoires. De plus, les règles de gestion des financements de la recherche devraient être assouplies pour que des acteurs de terrain qui mènent de telles actions puissent bénéficier d'un soutien financier.

## Besoins pour la société

Alors que les scientifiques produisent de plus en plus de résultats alertant sur l'accélération des conséquences du dérèglement climatique et de l'empreinte anthropique sur l'environnement, la mise en œuvre de politiques durables et efficaces pour accompagner la transition environnementale peine à se concrétiser. Cette lenteur s'explique en partie par la difficulté à modifier les pratiques individuelles et collectives, modifications dont l'acceptabilité est souvent limitée. L'urgence environnementale implique donc toutes les sphères de la société et doit générer des actions de formation, le développement de nouvelles compétences et nouveaux métiers, ainsi que des partenariats renforcés entre la Science et la Société, incluant des démarches de science participative et des actions de communication.

### Compétences citoyennes

#### Éclairer le débat citoyen

Alors que les questions liées au changement climatique et à la transition écologique occupent une place de plus en plus importante dans les débats publics, la relation des citoyens avec ces sujets reste encore très disparate (cf. p. 16). Cela peut être dû à l'éco-anxiété que ces questions suscitent, mais aussi, d'un manque général de culture scientifique et technique parmi les citoyens et l'intervention non-concertée de différents experts pour communiquer sur ces sujets dans la sphère publique. Pour remédier à cette situation, il est primordial d'agir à plusieurs niveaux : i) renforcer la formation scientifique des jeunes, élèves du primaire et du secondaire, au-delà des mathématiques, afin d'encourager les vocations vers les filières scientifiques, notamment celles dédiées à l'environnement au sens large, ii) généraliser un socle de connaissances en sciences naturelles et environnementales dans l'enseignement supérieur quelles que soient les spécialités (formation à la TEDS au niveau Licence, impulsée par le rapport de Jouzel & Abbadie, 2020) et iii) ouvrir les campus au grand public (visites de terrain et de laboratoires, ouvertures de cours « tout au long de la vie », conférences grand public, etc.).

Les experts de la communauté SIC souhaitant communiquer sur leurs savoirs font part de difficultés à communiquer leurs découvertes et souhaitent être accompagnés par des formations en média training. Ces formations les aideraient à communiquer efficacement dans les médias et à convaincre de la pertinence de l'action de recherche scientifique. S'impliquer dans ces missions de diffusion des résultats de la recherche nécessite une reconnaissance de ces missions dans les carrières (cf. ci-dessus). Il revient donc à nos institutions d'accepter et valoriser la non-productivité scientifique directe au profit des actions avec et pour la société.

#### Former les journalistes et politiques aux recherches en SIC

Qu'ils soient déjà en poste ou encore étudiants, les journalistes et les politiques ont besoin d'être mieux formés aux recherches environnementales, ce qui peut se faire sous forme de formations initiales ou continues, avec des spécialités comme « Médias & Sciences environnementales » ou « Sciences politiques et Sciences environnementales ». En ce sens, l'État a mis en place des chargés de mission climat-biodiversité-ressources qui organisent dans chaque Région les formations des cadres de la fonction publique sur ces trois thèmes.

### Compétences dans le cadre de nouveaux métiers ou nouvelles approches

L'émergence de nouveaux métiers est à considérer pour accompagner les enjeux de demain en matière de connaissance et de préservation de l'environnement ainsi que de développement socio-économique dans un contexte de transitions vers une société soutenable (en matière de maîtrise des risques naturels), plus sain (en matière de qualité de l'environnement) et bas carbone. Réussir ces transitions nécessaires engage la communauté SIC qui doit s'adapter aux nouveaux besoins de la recherche comme ceux de la société (e.g. PME

dont les bureaux d'études en environnement, collectivités territoriales, etc.).

### **Spécialistes des sciences de la durabilité**

La science de la durabilité, traitant des interactions entre les systèmes naturels et sociaux, et de la manière dont ces interactions affectent le défi de la durabilité, couvre une grande diversité de disciplines, et de champs de recherche avec, en son cœur, la transdisciplinarité et l'interdisciplinarité. Le développement de cursus en sciences de la durabilité autour de nexus systémiques (eau-alimentation-climat ou énergie-alimentation-climat, économie-droit-environnement, etc) conduit à la formation des professionnels d'un nouveau type : des spécialistes ayant une vision holistique et systémique de questions environnementales avec la capacité de poser des diagnostics sur des problématiques précises, de les comprendre et de les expliquer en termes simples, de proposer des solutions, voire de contribuer à leur mise en œuvre.

### **Spécialistes des données, de leur traitement et leur modélisation**

Le développement de l'observation à haute fréquence, à la fois temporelle et spatiale, à petite et grande échelles, conduit à une production croissante et massive de données (cf. chapitre « Données en SIC » p. 104). Le monde socio-économique et les collectivités locales et territoriales, sont à la fois producteurs et utilisateurs de ces données. Le traitement (curation et validation), la modélisation des données environnementales, le développement d'outils associés (entrepôts et services) et au-delà ont fait croître le besoin d'informaticiens, de data-scientists, numériciens, géomaticiens et modélisateurs ayant des compétences en sciences environnementales dans les entreprises et les administrations.

### **Community managers pour les sciences participatives environnementales**

Comme mentionné précédemment, le développement de la science participative fait émerger le besoin d'animateurs pour la gestion de sites collaboratifs, de communautés de participants en ligne (ou *community managers*). Ce type de besoin pourrait être couvert à l'échelle des OSU.

## **Compétences dans le cadre de nouvelles demandes**

### **Maintien des compétences**

Si les compétences dans les SIC doivent s'adapter aux nouveaux besoins, il est important de rappeler ici que différentes spécialités de formation des professionnels pour répondre aux nombreux défis du secteur du développement durable doivent être préservées et renforcées dans les établissements d'enseignement supérieur. Il s'agit des métiers liés à l'eau et sa gestion, aux déchets, à la protection de la nature, aux énergies renouvelables et leurs impacts, aux géoressources et aux impacts générés par leurs exploitations, aux risques naturels et à la géotechnique.

### **Répondre aux nouvelles demandes**

Dans le cadre de nouvelles demandes, la sortie attendue d'une directive cadre européenne sur les sols devrait conduire à un besoin croissant de recrutement de pédologues et plus largement des spécialistes en sciences du sol abordant les questions de qualité des sols et du proche sous-sol, incluant les sols urbains (technosols). L'observation et la mesure *in situ* se développent à la fois pour la surveillance de l'environnement dans les administrations mais aussi, dans le cadre des dispositifs nationaux d'observation de recherche dans tous les organismes de recherche et établissements d'enseignement supérieur et de recherche en environnement. Ce développement doit s'accompagner d'emplois de techniciens et d'ingénieurs pour assurer leur suivi.

## **Formation initiale et continue, alternance**

Au-delà de la question des contenus des formations se pose la question du transfert de ces connaissances et compétences et du public visé. Nous distinguons dans les paragraphes suivants la nécessité de proposer des formations initiales et continues.

### **Formation initiale**

Il existe déjà de nombreuses formations dédiées en partie ou exclusivement à notre champ disciplinaire. Elles relèvent de la nomenclature nationale publiée en 2014 ou y ont été ajoutées depuis et correspondent à des mentions dites spécifiques. Récemment de nouvelles

formations se sont ouvertes telles que le Master en Science de la durabilité. Toutefois, il ressort des autres chapitres de cette prospective un besoin en formation initiale dans le domaine des Sciences du Sol. Cette discipline a été classée dans la catégorie des disciplines rares (<https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/cartographie-des-disciplines-rares-46362>), elle nécessite donc une attention toute particulière que la publication de la directive cadre sur les sols va rendre critique car un grand nombre d'experts sera alors nécessaire.

Le développement de la science participative doit s'accompagner de formation au niveau Master, soit sous forme d'unités d'enseignement soit sous forme de

cursus ciblés. Pour pallier le manque de compétences dans certains établissements d'enseignement supérieur qui ne peuvent pas tout couvrir en matière de formation, l'idée d'un catalogue d'unités d'enseignement spécialisées à partager nationalement a émergé pour des enseignements groupés en présentiel ou pour des enseignements en distanciel. Ce catalogue pourrait aussi comprendre des visites et des stages de terrain.

Plus largement, la formation des étudiants de premier cycle à la transition écologique pour un développement soutenable pour les conscientiser, les doter tous de connaissances scientifiques en la matière se met progressivement en place dans tous les établissements d'enseignement supérieur suite au rapport de Jouzel & Abbadie (2020). Notre communauté devra veiller à ce que cette formation implique bien les SIC *sensu lato* au-delà des sciences climatiques.

## Formation continue

Nous entendons ici par formation continue la formation destinée à une personne en activité cherchant un complément de formation afin d'évoluer dans sa carrière par exemple ou d'acquérir des compétences nouvelles lui permettant de mieux réaliser son travail actuel. Le domaine du numérique ressort tout particulièrement. Nous pouvons envisager deux approches complémentaires pour faire face à cette demande de formation continue : i) utiliser les blocs de compétences

des formations existantes (toutes les formations initiales sont désormais organisées en formation continue (cf. fiches du répertoire national des certifications professionnelles), et ii) mettre en place des formations spécifiques. Les premières sont plus à destination d'un public extérieur à notre communauté, les secondes à destination de notre communauté.

## Pertinence de la formation par alternance

Nous avons constaté que l'arrivée d'apprentis dans nos unités, permise par les politiques favorables de nos organismes, apporte un soutien et un renouveau tangibles à nos tâches d'observation. Nous avons pu identifier dans les chapitres qui précèdent l'expression de besoins que nous qualifierons d'extérieurs à nos champs disciplinaires « classiques ». La question est de savoir comment réussir à attirer les autres disciplines dont les SIC pourraient avoir besoin vers ce domaine. Par exemple, comment attirer des personnes formées en IA dans les SIC ? La formation par alternance nous paraît être une opportunité pour accroître l'attractivité nécessaire. En effet, elle va permettre à l'alternant de mettre en œuvre sa discipline sur un objet qui *a priori* est perçu comme trop loin de celle-ci, et lui laisser le temps de construire son projet professionnel.

# Outils

À l'échelle nationale, nous disposons de structures spécifiques dédiées à la formation : les OSU représentent probablement l'organisation la plus pertinente et la plus visible. Au-delà du fait que les OSU soient des composantes universitaires, ils mettent en œuvre la politique d'observation de notre champ disciplinaire et également de notre dispositif d'analyse au sein de plateformes dédiées. Ces dispositifs, opérés par les OSU, contribuent activement à la formation des personnels mais encore trop peu à la formation des étudiants lorsqu'ils ne sont pas en thèse, bien que quelques initiatives existent (e.g. Rennes).

Nous disposons également d'une université numérique thématique (UNT) dédiée : l'UVED. Cette UNT dispose de ressources propres mais aussi de ressources mises à disposition permettant une mutualisation aisée.

Dans le cadre des financements du Secrétariat général pour l'investissement (SGPI), des structures dédiées au lien entre la recherche et la formation ont été mises en place sous la forme d'écoles universitaires de recherche (aussi nommées *graduate schools*). Certaines universités ont également fait le choix de structurer l'ensemble de leur offre de formations au sein de *graduate schools*. Ces

structures permettent d'avoir, par exemple, un espace pluridisciplinaire orienté « objet » (cf. EUR H2O/Lyon, EUR Climat).

Enfin, dans les dispositifs issus de la Loi de Programmation de la Recherche (LPR), notons l'existence des Chaires de Professeur Junior (CPJ) à l'Université, qui, là aussi, font un lien fort entre Recherche et Formation, et sont de ce fait une opportunité à intégrer dans les outils permettant de développer une nouvelle offre de formation ou de la renforcer, notamment en SIC.

## Références

- Jouzel J. & Abbadie L., 2020. *Rapport du groupe de travail « Enseigner la transition écologique dans le supérieur »*. <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/enseigner-la-transition-ecologique-dans-le-superieur-51505>



Travaux pratiques de l'Action Nationale de Formation DecaPin (Déploiement de capteurs in Natura) organisée par le Réseau Technologique sur les Capteurs en Environnement (RTCE). Les stagiaires ont configuré des cartes Arduino avec des capteurs environnementaux, avant leur déploiement *in natura*. Les données étaient ensuite récupérées via le protocole LoraWan implémenté sur les modules Arduino puis visualisées dans Grafana.  
© RTCE 2023

# Programme national écosphère continentale et côtière - EC2CO



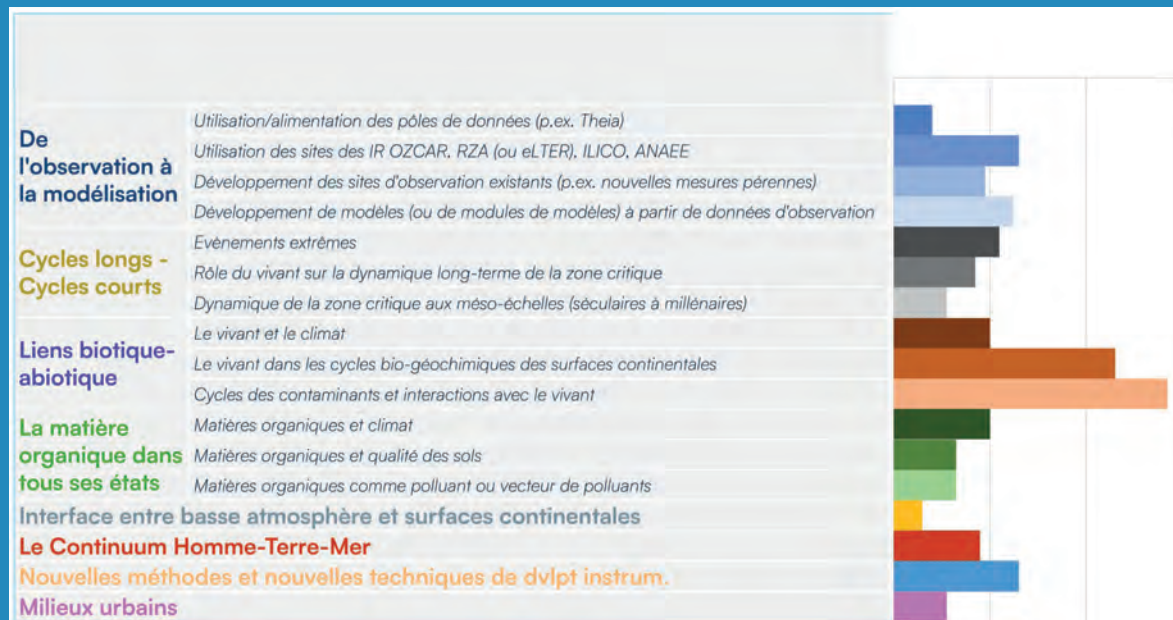
# Comment le programme national (PN) EC2CO a permis de mettre en œuvre les prospectives scientifiques SIC 2018-2022 ?

A la suite du précédent exercice de prospectives et afin d'en mettre en œuvre les grandes orientations, la réflexion menée sur les contours des actions thématiques a permis de définir les périmètres des trois actions thématiques structurant actuellement le programme EC2CO : Hybige (Les hydrobiogéosystèmes et leurs interactions), Dycovi (Dynamique des contaminants en interactions avec le vivant) et Microbiome (Les microorganismes dans l'environnement). S'il reste identifié comme le PN SIC de l'INSU, le programme EC2CO s'adresse à l'ensemble de la communauté nationale SIC et est financé par un large consortium de partenaires (CNRS Écologie & Environnement, CNRS Chimie, Andra, BRGM, CEA, CNES, Ifremer, INRAe, IRD, MENESR, Météo-France,

MITI, OFB et Univ. Gustave Eiffel pour les AAP 2018-2024). Un sondage réalisé au printemps 2023 auprès des 188 projets lauréats des AAP EC2CO 2018-2021 a montré que cette (re-)définition des actions thématiques avait effectivement permis de couvrir l'essentiel des thématiques abordées dans le document de prospective, faisant de ce programme un élément clé pour décliner la prospective scientifique INSU et CNRS Écologie & Environnement dans le domaine des surfaces et interfaces continentales (Figure 1). Il faut également noter le fort taux de retours à ce sondage (~75% de réponses), qui permet d'en consolider les résultats et démontre l'intérêt de la communauté SIC pour ce programme national.



Figure 1. Thématiques du document de prospectives 2018-2022 couvertes par les 139 projets ayant répondu à l'enquête du printemps 2023 (barres grisées: 20 projets — plusieurs réponses possibles par projet). © Sandrine Plaud-Guérin, Bruno Lanson.



En parallèle de cette refonte des actions thématiques, l'appel à projets commun avec le programme Lefe a été poursuivi pour maintenir le soutien à l'étude du continuum Terre-Mer. Ce continuum a, de plus, fait l'objet d'une attention spécifique au travers de l'affichage d'un axe transverse dédié aux « écosystèmes d'interface fleuve-mer : fonctionnement et dynamique » lors de l'AAP

2020. Cet axe transverse a bénéficié du soutien financier spécifique de l'Office Français pour la Biodiversité et a permis le financement substantiel d'un nombre restreint de projets fédérateurs (DeltaRhône, RebelRed et RunTime).

Ces dernières années, l'INSU et le BRGM ont souhaité accompagner la mise en place du réseau thématique

Taema (Transition écologique des anciennes exploitations de minerais arséniés), porté par les deux organismes, en affichant également un axe transverse dédié lors des AAPs EC2CO sur la période 2022 à 2024. Cet axe transverse, moins ambitieux financièrement, n'a toutefois pas permis de faire émerger une dynamique ou de structurer une communauté autour de cette thématique et n'a donc pas été poursuivi.

Au cours de la période écoulée, les AAP du programme EC2CO ont intégré les outils programmatiques définis par l'INSU pour ses programmes nationaux (e.g. projets à risques ou de rupture, projets visant à l'exploitation des données et services des IR et projets collaboratifs). L'analyse des projets soumis ou financés lors des AAP concernés a mis en évidence une appétence réduite pour les projets priorisant « l'exploitation des données et services des infrastructures de recherche », avec ~10 % des projets soumis ou financés entrant dans ce cadre programmatique. Le sondage réalisé au printemps 2023 nuance toutefois fortement ce constat et montre à l'inverse un important effort de valorisation et de modélisation des données d'observation dans les projets soutenus par le programme EC2CO sur cette période, en dépit du faible succès de l'outil programmatique dédié, peut-être desservi par sa dénomination jugée peu valorisante par la communauté SIC. Même si les outils programmatiques n'ont pas été reconduits pour l'AAP 2025, il reste souhaitable que le programme EC2CO permette de mieux exploiter ces infrastructures et d'en mieux valoriser les données et services.

Ce rapide bilan met clairement en lumière le rôle essentiel du programme EC2CO pour décliner et soutenir les thématiques scientifiques mises en avant lors des exercices de prospectives. Le programme EC2CO a également fortement contribué, depuis sa création, à la structuration d'une communauté de laboratoires et de chercheurs, chercheuses, et personnels techniques étudiant les Surfaces et Interfaces Continentales dans leur acception la plus large. Sur la période 2018-2024, le programme EC2CO a ainsi permis le financement de plus de 300 projets dans plus de 90 laboratoires universitaires et unités mixtes du CNRS, mais également dans les laboratoires propres de partenaires tels que INRAE ou Ifremer.

Cette structuration transparait également au travers de la capacité des porteurs de projets soutenus pas le programme EC2CO à obtenir des financements complémentaires et/ou faisant suite aux travaux prévus dans la cadre du projet financé. Seuls 25 % des répondants au sondage du printemps 2023 ont ainsi déclaré ne pas avoir recherché ou obtenu de tels financements. À l'inverse, environ la moitié des répondants avaient, au moment du sondage, pu capitaliser sur les résultats obtenus dans le cadre de leur projet EC2CO pour générer une dynamique, et les résultats préliminaires nécessaires, pour obtenir d'autres financements. Ces financements, généralement très supérieurs à ceux accordés par le programme EC2CO, ont été obtenus auprès d'une grande variété de guichets

(ANR, ERC, Régions, Universités, organismes ...) et ont été utilisés en complément de l'étude objet du projet EC2CO ou pour le développement d'un projet de plus grande ampleur faisant suite à ce projet. À ce titre et *via* des financements relativement modestes, le programme EC2CO joue pleinement un rôle de catalyseur permettant de tester des hypothèses, souvent originales, dans des projets à risques avant de monter des projets engageant des consortiums plus vastes et soumis à d'autres guichets.

De ce point de vue, l'introduction des projets « à risques ou de rupture » dans la palette des outils programmatiques des programmes nationaux de l'INSU a certainement eu un effet bénéfique en permettant l'émergence d'une science aux frontières. L'appétence des collègues pour cet outil a ainsi conduit ces dernières années à la soumission (et au financement) à parts égales de ces projets et de projets « collaboratifs » de plus grande ampleur. Même dans le contexte actuel de disparition des outils programmatiques, le financement de tels projets, visant à valider une hypothèse et axés sur la démonstration d'une preuve de concept, devra rester un élément clé du programme EC2CO dans les années à venir. L'effet levier potentiel de ces projets est en effet considérable alors que leur financement est souvent difficile du fait de leur ampleur limitée et de la prise de risques importante.

Dans tous les cas, la valorisation des résultats issus des projets financés par EC2CO est très satisfaisante avec en moyenne ~2,5 publications et ~3,3 présentations dont les données ont été majoritairement obtenues dans le cadre du projet pour un budget moyen global de 26 k€ pour les projets financés (source : questionnaire printemps 2023 adressé aux projets lauréats des AAPs 2018-2021). Une recherche documentaire effectuée sur le Web of Science confirme ces chiffres puisqu'annuellement ~100 à 120 articles mentionnent EC2CO comme source de financement, pour un total de 85-90 projets fonctionnant simultanément une année donnée, soit plus d'une publication par projet financé et par an.

**“ Sur la période 2018-2024, le programme EC2CO a ainsi permis le financement de plus de 300 projets dans plus de 90 laboratoires universitaires et unités mixtes du CNRS, mais également dans les laboratoires propres de partenaires tels que INRAE ou Ifremer. ”**

# Quelles évolutions souhaitables pour une meilleure adéquation avec l'évolution des thématiques scientifiques et du contexte ?

L'effet structurant du programme EC2CO pour la communauté de laboratoires et de chercheurs, chercheurs et personnels techniques étudiant les Surfaces et Interfaces Continentales est indéniable comme le montre le court bilan ci-dessus. L'organisation de journées de restitution dédiées, souhaitable dans un futur proche, permettrait sans aucun doute à ces personnels d'élargir leurs horizons et de générer ainsi de nouvelles dynamiques, synergies et projets en particulier aux interfaces entre disciplines.

Le programme national EC2CO contribuera au soutien financier de ces projets et viendra ainsi accompagner et soutenir les prospectives scientifiques telles que décrites dans le présent document. L'évolution éventuelle des contours des actions thématiques actuelles (Dycovi, Hybige et Microbiome) ne pourra être envisagée qu'une fois le document de prospective finalisé et fera l'objet de discussions entre la commission spécialisée SIC, les responsables de ces actions thématiques et la présidence du programme national en concertation avec les directions scientifiques du domaine.

En parallèle de ces actions thématiques, le programme EC2CO pourra également proposer des financements sur des axes transverses ou des priorités scientifiques spécifiques défini(e)s avec les partenaires. Il semble toutefois essentiel que le programme EC2CO continue à privilégier des financements « blancs », dans le cadre thématique défini dans ce document de prospectives, afin de favoriser l'innovation et la prise de risques au travers de l'émergence de nouveaux concepts, de méthodes innovantes. Ce rôle initiateur constitue en effet l'essence du programme EC2CO en permettant la démonstration de preuves de concept ou l'émergence de nouveaux consortiums, autant d'éléments-clés pour la recherche de financements complémentaires. La multiplication et la diversification des AAP à tous les niveaux (internationaux, nationaux, régionaux, locaux) doit toutefois, amener le programme EC2CO, comme l'un des programmes nationaux de l'INSU, à réfléchir sur la stratégie de financement permettant de valoriser au mieux l'effort financier consenti par les partenaires.

Cette diversification du paysage et des possibilités de financement a, logiquement, engendré ces dernières années une baisse du nombre de projets soumis en réponse aux AAP EC2CO (de ~180 projets/an pour les AAP 2018-2020 à ~105 projets/an pour les AAP 2022-2024). Malgré une légère contraction du budget du programme EC2CO sur la même période (2018-2020 : ~1200 k€/an, 2022-2024 : ~1070 k€/an), la baisse du nombre de soumissions a permis d'atteindre des taux de succès incitatifs puisqu'environ 40% des nouveaux projets soumis ont été financés ces dernières années (AAP 2022 à 2024). Cette baisse, associée à des demandes financières plus réalistes et mieux justifiées, a également permis d'accroître le taux de financement des projets lauréats (par rapport aux demandes) et de financer un nombre limité de projets significativement au delà du budget moyen de 26 k€.

D'un point de vue plus pragmatique, quelques évolutions des possibilités de financement autorisées par le programme devront certainement être apportées pour permettre de soutenir l'innovation mais aussi la valorisation de données existantes dans tous les domaines. Par exemple, la possibilité de financer des gratifications de stage, démarrée à petite échelle en 2024, pourrait être amenée à être élargie, les résultats du sondage de 2023 ayant montré la forte contribution des stagiaires à la réalisation des projets EC2CO, avec ~ 50% des projets ayant mobilisé 2 stagiaires ou plus.

Enfin, le programme EC2CO, comme les autres programmes nationaux de l'INSU, devra s'adapter pour mieux intégrer les nécessaires efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre et favoriser ainsi le développement d'activités de recherche durables. En particulier, la valorisation de données et/ou d'échantillons bancarisés sera encouragée. La forme et l'intensité que devront prendre ces contraintes, de même que l'éventuelle prise en compte de l'empreinte environnementale dans l'évaluation globale des projets, feront l'objet d'une réflexion collective spécifique.

# Glossaire

<b>AAP</b>	<i>Appel A Projets</i>
<b>ACTRIS</b>	<i>Aerosol, Clouds, and Trace gases Research InfraStructure</i>
<b>ADEME</b>	<i>Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie</i>
<b>ADN</b>	<i>Acide Desoxyribonucléique</i>
<b>ADNe</b>	<i>Acide Desoxyribonucléique environnemental</i>
<b>AllEnvi</b>	<i>Alliance nationale de recherche pour l'Environnement</i>
<b>AnaEE</b>	<i>Analyses et Expérimentations pour les Écosystèmes</i>
<b>Andra</b>	<i>Agence Nationale pour la gestion des déchets Radioactifs</i>
<b>ANR</b>	<i>Agence Nationale de la Recherche</i>
<b>ARN</b>	<i>Acide Ribonucléique</i>
<b>BRGM</b>	<i>Bureau de Recherches Géologiques et Minières</i>
<b>CEREMA</b>	<i>Centre d'Etudes et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement</i>
<b>CFMI</b>	<i>Chargé de Mission pour la Formation de l'Institut</i>
<b>CIRAD</b>	<i>Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement</i>
<b>CNAP</b>	<i>Conseil National des Astronautes Physiciens</i>
<b>CNES</b>	<i>Centre National d'Études Spatiales</i>
<b>CNRS</b>	<i>Centre National de la Recherche Scientifique</i>
<b>CS SIC</b>	<i>Commission Spécialisée Surfaces et Interfaces Continentales</i>
<b>CS IIT</b>	<i>Commission Spécialisée Instrumentation Innovante Transverse</i>
<b>DT INSU</b>	<i>Division Technique de l'INSU</i>
<b>eLTER</b>	<i>european network of Long-Term Ecosystem Research</i>
<b>EC2CO</b>	<i>Programme national Écosphère Continentale et Côtière</i>
<b>EdF</b>	<i>Électricité de France</i>
<b>EPIC</b>	<i>Établissements Publics à caractère Industriel et Commercial</i>
<b>ESR</b>	<i>Enseignement Supérieur et Recherche</i>
<b>ESFRI</b>	<i>European Strategy Forum on Research Infrastructures</i>
<b>ETM</b>	<i>Éléments trace métalliques</i>
<b>FAIR</b>	<i>Facile à trouver, Accessible, Interopérable et Réutilisable</i>
<b>FRE</b>	<i>Fédération de Recherche en Environnement</i>
<b>GES</b>	<i>Gaz à effet de serre</i>
<b>CPJ</b>	<i>Chaire Professeur Junior</i>
<b>GDR</b>	<i>Groupement De Recherche</i>
<b>GIEC</b>	<i>Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat</i>
<b>GMI</b>	<i>Gestion et maintenance des instruments</i>
<b>GREC</b>	<i>Groupe Régional d'Experts sur le Climat</i>
<b>GT</b>	<i>Groupe de Travail</i>
<b>IA</b>	<i>Intelligence artificielle</i>
<b>ICOS</b>	<i>Integrated carbon observatory system</i>
<b>Ifremer</b>	<i>Institut Français de recherche pour l'exploitation de la Mer</i>

<b>ILICO</b>	<i>Infrastructure de recherche LIttorale et COtière</i>
<b>INRIA</b>	<i>Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique</i>
<b>INRAe</b>	<i>Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'environnement</i>
<b>INSU</b>	<i>Institut National des Sciences de l'Univers</i>
<b>IR</b>	<i>Infrastructure de Recherche</i>
<b>IRD</b>	<i>Institut de Recherche pour le Développement</i>
<b>JERICO</b>	<i>Joint European Research Infrastructure for Coastal Observatories</i>
<b>LabEx</b>	<i>Laboratoire d'Excellence</i>
<b>LIDAR</b>	<i>Light Detection And Ranging</i>
<b>MITI</b>	<i>Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires</i>
<b>MTES</b>	<i>Ministère de la Transition Écologique et Solidaire</i>
<b>OA</b>	<i>Océan Atmosphère</i>
<b>OFB</b>	<i>Office Français de la Biodiversité</i>
<b>OHM</b>	<i>Observatoires Homme-Milieu</i>
<b>ONF</b>	<i>Office National des Forêts</i>
<b>OSL</b>	<i>Optically Stimulated Luminescence</i>
<b>OSU</b>	<i>Observatoire des Sciences de l'Univers</i>
<b>OZCAR</b>	<i>Observatoires de la Zone Critique: Applications et Recherche</i>
<b>PEPR</b>	<i>Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche</i>
<b>PIA4</b>	<i>4<sup>e</sup> Programme d'Investissement d'Avenir</i>
<b>PPR</b>	<i>Programme Prioritaire de Recherche</i>
<b>REEs</b>	<i>Rare Earth Elements</i>
<b>RéGEF</b>	<i>Réseau Géochimique et Expérimental Français</i>
<b>RENECOFOR</b>	<i>REseau National de suivi à long terme des ECOssytèmes FORetiers</i>
<b>RT</b>	<i>Réseau Thématique</i>
<b>RTCE</b>	<i>Réseau Technologique sur les Capteurs en Environnement</i>
<b>RZA</b>	<i>Réseau des Zones Ateliers</i>
<b>SHS</b>	<i>Sciences Humaines et Sociales</i>
<b>SIC</b>	<i>Surfaces et Interfaces Continentales</i>
<b>SNO</b>	<i>Service National d'Observation</i>
<b>STXM</b>	<i>Scanning Transmission X-ray Microscopy</i>
<b>TOSCA</b>	<i>Terre, Océan, Surfaces Continentales, Atmosphère</i>
<b>TRUST</b>	<i>Transparency, Responsibility, User focus, Sustainability, Technology</i>
<b>VDBI</b>	<i>Villes Durables Bâtiments Innovants</i>
<b>ZA</b>	<i>Zones Ateliers</i>

Sous la coordination de Sophie Ayrault — Directrice Adjointe Scientifique du domaine "Surfaces et interfaces continentales" de l'INSU, Gilles Pinay — Directeur Adjoint Scientifique "Écologie fonctionnelle" du CNRS Écologie & Environnement et Eric Ferrage — Président de la CS SIC

**Coordination éditoriale :** Julie Amblard

**Impression :** CNRS DR1 IFSEM secteur de l'imprimé

**Conception/ Maquette :** Page B

**Décembre 2024**

**Photo de couverture :** © Stephane Lesbats / Ifremer CC-BY. Vue aérienne du fleuve côtier Aber-Ildut, près du village de Lanildut dans le Finistère. L'Aber-Ildut est le plus méridional des abers et débouche dans la mer Celtique face à l'île d'Ouessant.



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*





**Institut national des sciences  
de l'Univers du CNRS**

3, rue Michel-Ange  
75794 Paris Cedex 16  
[insu.cnrs.fr](http://insu.cnrs.fr) | [X](#)