

Liste des contributions

Les liens vers les pages des contributions peuvent ne pas être fonctionnels dans votre navigateur - Dans ce cas, il faut télécharger le fichier et l'ouvrir avec un logiciel spécifique (p.ex. Acrobat reader)

A few (short) ideas about land surface model developments based on physical and AI approach

Xiaoni Wang

Adaptation des communautés microbiennes aux stress biotiques et abiotiques

Aurélie CEBRON, Pascale BAUDA, Thierry BEGUIRISTAIN, Patrick Billard, Damien Blaudez, Michaël Danger, Marie Le Jean, Christophe Pagnout, Asfaw Zegeye

ALMOD PC1 PEPR FairCarbon

Pierre Barré

Apport de la modélisation physique au suivi de l'évolution des zones de pergélisol côtier

Marianne Font-Ertlen, Dominique Mouazé

Approche intégrée Modélisation-Expérimentation-Analyse à l'échelle moléculaire

Marc Blanchard

Continuum Terre-Mer (CTM) et interactions homme-environnement

LEMAR UMR 6539 Laboratoire Des Sciences de l'Environnement Marin

Contribution au theme 16 / Equipe MOSAIC du LSCE

cedric bacour, Fabienne Maignan, catherine ottlé, Elodie Salmon, Nicolas Vuichard

fulltext : Contribution prospectives

Contribution au thème 20 / Equipe MOSAIC du LSCE

cedric bacour, Fabienne Maignan, catherine ottlé, Elodie Salmon, Nicolas Vuichard

Contribution de l'équipe de géochimie d'ISTerre

Cécile GAUTHERON

Contribution de la CSIT à la prospective SIC

Commission CSIT / Eric Defer

Contribution de la prospective OA 2023 (CSOA)

Claire Delon

**Contribution équipe Pollutions Environnement Santé Territoires (PEnSTer),
HydroSciences Montpellier**

Corinne Casiot, Marina Héry, Éléonore Resongles, Odile Bruneel

Contribution générale CNRM

Samuel Morin

Contribution OA pour le milieu urbain

Jean-François Léon

**Contribution sur le développement des techniques spectroscopiques sondant l'échelle
moléculaire en sciences de l'environnement**

Pierre Le Pape

Cycle biogéochimique du soufre et éléments "chalcophiles"

Pierre Le Pape

**Cycles bio-géochimiques des éléments stratégiques : approches interdisciplinaires
intégrées du manteau à l'impact environnemental dans les SIC ou comment associer
géologues et écotoxicologues**

Laure Giamberini, Anne-Sylvie André-Mayer, Laetitia MINGUEZ, Yves Marrochi

Cycles biogéochimiques N et P : des frontières planétaires à la transition écologique des systèmes alimentation/excrétion

Marine Legrand, Fabien Esculier

Cycles de vie et dynamiques de populations

LEMAR UMR 6539 Laboratoire des Science de l'Environnement Marin

Des données aux connaissances

Jean Riotte, Priscia Oliva

Description et analyse de la biodiversité

LEMAR UMR 6539 Laboratoire Des Sciences de l'Environnement Marin

Développement de réseaux de capteurs connectés et données d'observation en territoires isolés

Guillaume BOUGER, Thomas Saucède

Dynamique des contaminants organiques et impact sur les écosystèmes (aquatiques)

Hélène BLANCHOUD, Thomas Thiebault, Elodie Guigon, Aurélie Goutte

Dynamique du carbone dans le continuum terrestre - aquatique

Laure Gandois, Julien Nemery

Dynamique et évolution des relations hôtes-micro-organismes

LEMAR UMR 6539 Laboratoire des Sciences de l'Environnement Marin

Eau dans la ville

Jean-Louis PERRIN, Christian Salles, Vincent Guinot, Patrick LACHASSAGNE

Ecohydrologie des milieux forestiers

Nolwenn Lesparre, Simon Carrière, Damien Jougnot, Benjamin Belfort, Sylvain Weill, Jean-Marc Limousin, Nicolas Delpierre

Enthousiasme en faveur de la pérennité du programme EC2CO

Olivier Evrard, Anthony Foucher

Étude des transferts de matière et d'énergie au sein des populations, des communautés et des écosystème

LEMAR UMR 6539 Laboratoire Des Sciences de l'Environnement Marin

Étudier la biogéochimie des zones critiques frontières -avant qu'il ne soit trop tard

Gael Le Roux, Sophia Hansson, Simon Gascoin, Laure Gandois, François De Vleeschouwer, Roman Teisserenc

Evolution de la ressource en eau dans les bassins anthropisés

Olivier Merlin / Groupe Eau du Cesbio

Flux aux interfaces

LEMAR UMR 6539 Laboratoire Des Sciences de l'Environnement Marin

Fonctionnement intégré des hydrosystèmes continentaux : complémentarité des approches de modélisation et d'observation au service de la ressource en eau

Ludovic Oudin, Vincent Thieu, Agnes Ducharne, Anne JOST, Valérie Plagnes, Danièle VALDES, Simon Carrière, Jean-Marie Mouchel, Laurence Lestel, Pierpaolo Zuddas, Josette Garnier, Gilles Billen

Fonctions microbiennes dans les écosystèmes anthropisés : apport des approches traits et des outils omiques

Aurélien CEBRON, Pascale Bauda, Thierry BEGUIRISTAIN, Patrick Billard, Damien Blaudez, Michaël Danger, Marie Le Jean, Christophe Pagnout, Asfaw Zegeye

Forçages terrestres et processus aux interfaces (contribution du CEFREM)

François Bourrin, Philippe Kerhervé, Sébastien Pinel, Carmen PALACIOS, Dominique Aubert, Bruno Charriere

Impact des processus abiotiques sur le vivant

Patricia Bonin

Intégration des processus évolutifs courts – Role des virus-

Patricia Bonin

Intégrer les enjeux environnementaux aux recherches sur les SIC

Laurent Jeanneau, Cecile Albert, Nicolas Champollion, Mathieu Chassé, Karin Dassas, Emilie Dassie, Maxime Debret, Simon Gascoin, Laure Guerit, Françoise Immel, Emilie Jardé, Jean Kempf, Valerie Le Dantec, Sylvie Massemin, Arnaud Mialon, odin marc, Anne Mone, Benjamin Musnier, Thierry Pellarin, Christophe Peugeot, Irene Schimmelpfennig, Tiphaine Tallec, Sylvain Kuppel

Interactions éco-biogéochimique au sein de la zone Critique : rôle particulier des écosystèmes régulateurs sur les flux de nutriments et de contaminants dans les bassins versants.

Sabine Sauvage

Intérêt d'analyser l'ADN environnemental

Olivier Evrard, Anthony Foucher

Interfaces milieu marin/Terre interne

Patricia Bonin

L'écotoxicologie microbienne pour comprendre les effets directs et indirect des contaminants, évaluer leur biodisponibilité et développer de nouveaux outils diagnostic

Aurélie CEBRON, Pascale Bauda, Thierry BEGUIRISTAIN, Patrick Billard, Damien Blaudez, Michaël Danger, Marie Le Jean, Christophe Pagnout, Asfaw Zegeye

La recherche sur les SIC à l'heure des crises sédimentaires

Olivier Evrard, Anthony Foucher

Le rôle clé joué par les colloïdes naturels sur la dynamique et la trajectoire environnementale des contaminants.

Rémi Marsac, Marc Benedetti, Charlotte Catrouillet, Yann Sivry, Mickael Tharaud, Eric Van Hullebusch

Les bioaérosols : Une problématique interdisciplinaire et des enjeux multiples aux interfaces environnementales

Pierre Amato, Françoise Binet

Les contaminants en milieu marin côtier

Patricia Bonin

Les couvertures d'altération et le temps long

Thierry Allard, Guillaume Morin, Etienne Balan

Les échelles de temps dans les SIC pour les reconstructions de trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques

Olivier Evrard, Anthony Foucher

Les interactions hôte-microbiote-environnement en écotoxicologie : Dreissena sp. comme modèle hôte

Pascal Poupin, Laure Giamberini, Fanny Louis, Laetitia MINGUEZ

Mangroves à l'anthropocène : enjeux de gestion de socio-écosystèmes menacés face aux changements globaux

Emma Michaud, marie arnaud, Marie-Christine Cormier-Salem, Anne Bousquet-Mélou, Philippe Cuny, François Fromard, antoine gardel, Claire Gollety, Swanne Gontharet,

Esméralda Longépée, Cyril Marchand, Cécile Militon, Valérie Morel, Pierre-Yves Pascal, Tony Robinet, Aldo Sottolichio, Gérard Thouzeau

Mécanismes moléculaires gouvernant la dynamique du carbone organique dans les SIC

Mathieu Chassé

Micropolluants et considération de la présence et des effets sur le biote de faibles doses de contaminants chimiques

Sophie Prud'homme, Laetitia MINGUEZ, Fanny Louis, Elise Billoir

Mieux comprendre le transport et la transformation des biocides urbains

Gwenaël Imfeld, sylvain payraudeau, Jeremy Masbou

Minéralogie urbaine

Pierre Le Pape

MITATE Lab Post-Fukushima studies, un exemple d'action transdisciplinaire

Olivier Evrard , Cécile Asanuma-Brice

Modélisation couplée bio-géochimie-transport de matière

Frédéric GERARD

Modélisation des systèmes SIC

Philippe Ackerer, Benjamin Belfort, Nolwenn Lesparre, Sylvain Weill

Modélisation du transfert de pesticides à l'échelle de grands bassins versants

Hélène BLANCHOU, Vincent Thieu, Marie Silvestre

Modélisation moléculaire de la nucléation et croissance cristalline des minéraux environnementaux

Julie Aafort

Observation, dynamique des écosystèmes et transition socio-écologique

LEMAR UMR 6539 Laboratoire Des Sciences de l'Environnement Marin

ObservationS en milieu urbain

Jérémy JACOB

Observations, Cryosphère et interactions avec les autres compartiments

Delphine SIX

Observatoire de la Zone Critique dans les TAAF

Sébastien Gogo, ERIC ARMYNOT du CHATELET, Anne-Kristel Bittebiere, François Chabaux, François De Vleeschouwer, Emilie Jardé, Gael Le Roux, Deborah Verfaillie

Observons nos Observatoires

Anaëlle Simonneau, Fabrice Rodriguez, Sébastien Gogo, Jean Sébastien MOQUET, Jean Nabucet

Osons un observatoire à long terme (30 ans) des impacts anthropiques des éoliennes en mer et du changement climatique

Anne-Claire Bennis, Nathalie Niquil, Alexei Sentchev, Faycal Rejiba, Lucille Furgerot, Jean-Philippe Pezy, Nizar Abcha, Pascal Claquin, Frida Ben Rais Lasram, François Schmitt, Elena Alekseenko

Outils et données

Armand Masion

Paléo-indicateurs, contaminants et énergie

Guillaume MORIN

Paléoclimats et paléoenvironnements des systèmes continentaux Néogènes et quaternaires d'Afrique et Paléogènes d'Europe

Johann Schnyder, Loic Segalen, Dominique Gommerly

Plasticité phénotypique en réponse aux changements de conditions biotiques et abiotiques : réponses individuelles et conséquences sur l'écosystème

LEMAR UMR 6539 Laboratoire Des Sciences de l'Environnement Marin

Plasticité phénotypique en réponse aux contaminants d'origine anthropique et aux microalgues toxiques : approche écotoxicologique

LEMAR UMR 6539 Laboratoire Des Sciences de l'Environnement Marin

Positionnement de la modélisation numérique de type Transport Réactif dans la communauté SIC

Christophe Tournassat, Cyprien Soullain

Proposition de compléments

Nathalie Vigier

Prospective métiers des Ingénieurs et Techniciens

Thierry LABASQUE

Quelle(s) grille(s) de lecture pour les réponses aux stress environnementaux ?

Simon Devin

Questionnement des interactions recherche-société : perceptions dans la communauté de modélisation des surfaces continentales

Sylvain Kuppel, Basile Hector, Jeremy Panthou

Réactivités des colloïdes et (bio)interfaces complexes de pertinence environnementale : l'importance des petites échelles.

Jerome Duval

Réponse des écosystèmes arctiques au changement climatique : impacts sur les cycles de l'eau, du carbone et des nutriments

Laure Gandois, Marie Alexis, Maialen Barret, Camille Bouchez, Christine Delire, Julien Fouché, Laurent Orgogozo, Antoine Séjourné, Liudmila Shirokova

Ressources aqua

Jérôme Labanowski, Leslie MONDAMERT

Restitution de l'atelier "Echanges surface - atmosphère dans la zone critique (particules, gaz à effets de serre, composés réactifs) des 6-7 juin 2023 à Toulouse"

Claire Delon, Didier Voisin, Virginie Marécal

Rétro-observations

Laurent Dezileau, Yoann Copard, Maxime Debret, bernadette Tessier

Rôle des micro-organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience

Patricia Bonin

Stability of environmental DNA as a biomarker

Stanislav Jelavic, Charline Giguet-Covex, Ludovic Gielly, Bruno Lanson

Suivi eaux continentales par télédétection & changement climatique

Guillaume RAMILLIEN, Jose Darrozes, Lucia SEOANE

Synthèse de la prospective OA 2023 concernant le continuum continent-océan

Nicolas Savoye

Traiter les eaux usées de façon durable en minimisant les intrants et en maximisant les bénéfices socio-écosystémiques

Emilie Muller, stéphane vuilleumier

Utilisation de capteurs et d'échantillonneurs passifs pour appréhender la contamination des milieux (aquatiques et atmosphériques)

Elodie Guigon, Hélène BLANCHOU, Aurélie Goutte, Thomas Thiebault, Jean-Marie Mouchel

Valorisation biotechnologique des produits d'origine marine (aquaculture, alimentation, santé, cosmétique)

LEMAR UMR 6539 Laboratoire Des Sciences de l'Environnement Marin

Valorisation des terres excavées en génie pédologique

Fabien HUBERT, Samuel Coussy

Variabilité hydrologique large-échelle et interactions aux interfaces continentales : ressource, risques, scénarios d'évolution

Nicolas Massei, Abderrahim Jardani, Matthieu Fournier

Vers une meilleure intégration des composantes aquatiques au sein du continuum Homme-Terre-Mer

Vincent Thieu, Goulven Laruelle, Marie SILVESTRE, Antoine CASQUIN, Mélanie RAIMONET, Josette GARNIER

vision intégrée du continuum homme / terre / mer

Yoann Copard, Christophe Rabouille, Wolfgang Ludwig

Métaux, éléments traces et contaminants aux interfaces continentales et interactions avec les (micro)organismes : de la molécule à l'écosystème

D. Amouroux, M. Goni, M.P. Isaure, R. Grimaud, S. Le Faucheur , A. Ranchou-Peyruse, B. Lauga, H. Preudhomme, et membres pole Chimie et Microbiologie de l'Environnement - UMR 5354 IPREM

Les polluants émergents dans les écosystèmes aquatiques

Mathilde Monperrus, Laurent Lancelleur, Thierry Pigot, Bahia Khalfaoui, Rémy Guyoneaud, Séverine Le Faucheur, Mathieu Sebilo, Aubin Thibaut de Chanvalon et membres pole Chimie et Microbiologie de l'Environnement - UMR 5354 IPREM

Plateforme lidar-HySpec Nantes-Rennes-Caen

P. Launeau, D. Lague, L. Froideval, É. Beucler

Vers une stratégie nationale autour des données 3D et séries temporelles 3D haute résolution

Groupe de travail GT4D INSU/SIC : Dimitri Lague, Paul Leroy (OSU Rennes) ; Patrick Launeau, Eric Beucler (OSU Nantes); Marion Jaud (IUEM Brest); Laurent Froideval, Edward Salameh (M2C Caen); Simon Gascoin (CESBIO)

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Dynamique du carbone dans le continuum terrestre - aquatique
Nom(s) et prénom(s)	Laure Gandois et Julien Némery Abril Gwenael Amann Benjamin Arthaud Florent Bertrand Guillaume Biron Romain Boithias Laurie Bouchez Camille Bouchez Julien Bougeais Ilann Campillo Sylvain Chatton Eliot Chaumillon Eric Clement Jean-Christophe Coffinet Sarah Colas Fanny Copard Yoann Dambrine Etienne Darboux Frédéric Darfeuil Sophie Domaizon Isabelle Dupuy Christine Etienne David Flipo Nicolas Fouché Julien Garnier Josette Gateuille David Gilbert Daniel Gogo Sébastien Grilli Roberto Guedron Stéphane Guillon Sophie Jenny Jean-Philippe Jezequel Didier Le Moal Pierre Leboutellier Caroline Lecoq Nicolas Legout Cédric Ludwig Wolfgang Lyautey Emilie Marchand Cyril

	<p>Masclaux Hélène Massei Nicolas Mavon Christophe Meleder Vona Metzger Edouard Millet Laurent Moatar Florantina Moquet Jean-Sebastien Nord Guillaume Polsenaere Pierre Poulenard Jérôme Raclot Damien Raimonet Mélanie Rasconi Serena Rius Damien Sanchez-Perez José-Miguel Sauvage Sabine Thieu Vincent Tisserand Delphine Tran-khac Viet Verneaux Valérie</p>
<p>Adresse(s) mail</p>	<p>laure.gandois@cnsr.fr julien.nemery@univ-grenoble-alpes.fr</p> <p>gwenael.abril@mnhn.fr benjamin.amann@univ-lr.fr florent.arthaud@univ-smb.fr guillaume.bertrand2@univ-fcomte.fr romain.biron@univ-grenoble-alpes.fr Laurie.BOITHIAS@Get.omp.eu camille.bouchez@univ-rennes1.fr bouchez@ipgp.fr ilann.bourgeois@univ-smb.fr sylvain.campillo@univ-grenoble-alpes.fr eliot.chatton@univ-rennes1.fr eric.chaumillon@univ-lr.fr Jean-Christophe.Clement@univ-smb.fr sarah.coffinet@univ-rennes1.fr fanny.colas@univ-lyon1.fr yoann.copard@univ-rouen.fr etienne.dambrine@inrae.fr Frederic.Darboux@inrae.fr sophie.darfeuil@univ-grenoble-alpes.fr isabelle.domaizon@inrae.fr cdupuy@univ-lr.fr david.etienne@univ-savoie.fr nicolas.flipo@minesparis.psl.eu julien.fouche@supagro.fr josette.garnier@sorbonne-universite.fr david.gateuille@univ-smb.fr daniel.gilbert@univ-fcomte.fr</p>

	sebastien.gogo@univ-orleans.fr roberto.grilli@cnrs.fr stephane.guedron@univ-grenoble-alpes.fr sophie.guillon@minesparis.psl.eu Jean-Philippe.Jenny@inra.fr didier.jezequel@inrae.fr pierre.le-moal@mnhn.fr caroline.leboutellier@inrae.fr nicolas.lecoq@univ-rouen.fr cedric.legout@univ-grenoble-alpes.fr ludwig@univ-perp.fr Emilie.Lyautey@univ-smb.fr cyril.marchand@unc.nc helene.masclaux@univ-fcomte.fr nicolas.massei@univ-rouen.fr christophe.mavon@univ-fcomte.fr vona.meleder@univ-nantes.fr edouard.metzger@univ-angers.fr laurent.millet@univ-fcomte.fr florantina.moatar@inrae.fr jean-sebastien.moquet@cnrs-orleans.fr Guillaume.nord@univ-grenoble-alpes.fr Pierre.Polsenaere@ifremer.fr jerome.poulenard@univ-smb.fr damien.raclot@ird.fr melanie.raimonet@univ-brest.fr Serena.Rasconi@inrae.fr damien.rius@univ-fcomte.fr jose-miguel.sanchez-perez@univ-tlse3.fr sabine.sauvage@univ-tlse3.fr vincent.thieu@upmc.fr delphine.tisserand@univ-grenoble-alpes.fr viet.tran-khac@inrae.fr valerie.verneaux@univ-fcomte.fr
--	--

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	x
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	

9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	x
13-Le continuum biotique/abiotique	x
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	x
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Le projet CarboNium « Dynamique du carbone dans le continuum terrestre - aquatique : Soutien aux infrastructures » du PEPR FairCarboN a pour ambition de contribuer à mieux documenter le cycle du carbone à l'interface des écosystèmes terrestres et aquatiques (carbone fluvial, zones humides), à l'interface entre les surfaces continentales et les océans (écosystèmes côtiers), et le long de systèmes fluviaux constituant le continuum Terre-Mer.

Le programme FairCarboN, vise à établir le rôle des surfaces continentales dans la neutralité carbone. A l'échelle globale (GIEC, AR6, 2021), les flux de carbone (C) des écosystèmes terrestres vers les eaux de surface (2.5 PgC/an) et les émissions depuis les écosystèmes aquatiques (1.5 PgC/an) sont du même ordre de grandeur que le flux net atmosphérique des écosystèmes terrestres (5.3 PgC/an, Le Quéré et al., 2017). Négliger, sous-estimer ou surestimer les pertes de C par les flux latéraux des écosystèmes terrestres va nécessairement conduire à des estimations inexactes du bilan du carbone des écosystèmes terrestres (Webb et al., 2019).

Les contributions naturelles et anthropiques à ces flux de carbone ne sont pas contraintes, et elles pourraient évoluer rapidement. En effet, les activités humaines ont un impact majeur sur la dynamique du carbone dans le continuum terrestre-aquatique. Les aménagements des rivières et la présence de barrages le long du continuum entraînent de profonds changements dans les cycles biogéochimiques fluviaux, influençant à la fois le piégeage du carbone et les émissions de gaz à effet de serre (GES ; CO₂ et CH₄) (Maavara et al., 2020). Les effets combinés du changement d'usage des terres et du changement climatique ont entraîné une augmentation des concentrations de C organique dissous dans les eaux de surface, notamment aux latitudes septentrionales, où les tourbières et le dégel du pergélisol sont les principaux contributeurs (Kritzberg et al., 2020). Partout, les crues exceptionnelles ont le potentiel de remobiliser davantage de carbone, en particulier particulaire (Abril and Borges, 2019). A l'échelle globale le métabolisme du carbone pendant le transfert dans les hydrosystèmes reste un processus majeur qui nécessite la mise en place de réseaux d'observation à différentes échelles pour le quantifier (Battin et al 2023). Les eaux continentales (rivières, lacs, zones humides...) sont un compartiment essentiel du cycle du carbone car elles contribuent fortement aux émissions de GES (CO₂ et CH₄). Pourtant, les flux d'émissions de GES sont très peu quantifiés, leurs dynamiques et forçages mal connus, et en particulier très peu d'estimations existent en France aujourd'hui (Marescaux et al., 2020). Les flux de méthane des zones humides et écosystèmes aquatiques, ont récemment augmenté à l'échelle globale (Peng et al., 2022), et constituent une grande incertitude sur le rôle de ces écosystèmes dans la régulation du climat (GIEC, AR6, 2021). En aval, le carbone et les nutriments transportés par les fleuves alimentent les écosystèmes côtiers qui captent une quantité significative de C atmosphérique, ou au contraire peuvent être émetteurs de GES. Dans ce transfert des fleuves vers la zone côtière, les estuaires sont le siège d'importantes transformations biogéochimiques dans le gradient de salinité. Les sédiments de lacs, les estuaires, les zones humides continentales et côtières, contiennent des stocks de carbone bien supérieurs aux sols agricoles et forestiers (Gilbert et al., 2021; Kauffman et al., 2020; Loisel et al., 2021; Tranvik et al., 2009). Bien que leur étendue géographique soit limitée, ces systèmes présentent des capacités d'accumulation de carbone qui sont cruciales à prendre en compte pour évaluer la réponse des surfaces continentales à la pression climatique.

Dans ce contexte, CarboNium se décline en 8 actions (WP), dont 2 actions transverses de synthèse de données de flux et de stocks de carbone, 5 actions d'instrumentation et d'acquisition de nouvelles données de la dynamique du carbone, dans les différents milieux concernés (bassins versants, zones

humides continentales et côtières, lacs et estuaires) et une action de modélisation, à l'échelle du continuum Terre-Mer.

References

- Abril G. and Borges A.V. 2019. Ideas and perspectives: carbon leaks from flooded land: do we need to replumb the inland water active pipe? *Biogeosciences* 16: 769–784. <https://doi.org/10.5194/bg-16-769-2019>
- Battin T.J., Lauerwald R., Bernhardt E.S., Bertuzzo E., Gener L.G., Hall R.O., Hotchkiss E.R., Maavara T., Pavelsky T.M., Ran L., Raymond P., Rosentreter J.A., and Regnier P. 2023. River ecosystem metabolism and carbon biogeochemistry in a changing world. *Nature* 613: 449–459. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05500-8>
- Gilbert P.J., Taylor S., Cooke D.A., Deary M.E., and Jeffries M.J. 2021. Quantifying organic carbon storage in temperate pond sediments. *Journal of Environmental Management* 280: 111698. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111698>
- Kauffman J.B., Adame M.F., Arifanti V.B., Schile-Beers L.M., Bernardino A.F., Bhomia R.K., Donato D.C., Feller I.C., Ferreira T.O., Jesus Garcia M. del C., MacKenzie R.A., Megonigal J.P., Murdiyarso D., Simpson L., and Hernández Trejo H. 2020. Total ecosystem carbon stocks of mangroves across broad global environmental and physical gradients. *Ecological Monographs* 90: e01405. <https://doi.org/10.1002/ecm.1405>
- Kritzberg E.S., Hasselquist E.M., Škerlep M., Löfgren S., Olsson O., Stadmark J., Valinia S., Hansson L.-A., and Laudon H. 2020. Browning of freshwaters: Consequences to ecosystem services, underlying drivers, and potential mitigation measures. *Ambio* 49: 375–390. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01227-5>
- Le Quéré, Corinne, et al. "Global carbon budget 2017." *Earth System Science Data* 10.1 (2018): 405-448.
- Loisel J., Gallego-Sala A.V., Amesbury MJ., et al. 2021. Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink. *Nature Climate Change* 11: 70–77. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00944-0>
- Maavara T., Chen Q.W., Van Meter K., Brown LE., Zhang J.Y., Ni J.R., and Zarfl, C. 2020. River dam impacts on biogeochemical cycling. *Nature Reviews Earth & Environment* 1(2): 103–116 <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0019-0>
- Marescaux A., Thieu V., Gypens N., Silvestre M., and Garnier J. 2020. Modeling inorganic carbon dynamics in the seine river continuum in France. *Hydrology and Earth System Sciences* 24(5): 2379–2398.
- Peng S., Lin X., Thompson R.L., Xi Y., Liu G., Hauglustaine D., Lan X., Poulter B., Ramonet M., Saunois M., Yin Y., Zhang Z., Zheng B., and Ciais P. 2022. Wetland emission and atmospheric sink changes explain methane growth in 2020. *Nature* 612: 477–482. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05447-w>
- Tranvik L.J., Downing J.A., Cotner J.B., et al. 2009. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography* 54: 2298–2314. https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Cette contribution concerne un projet ciblé du PEPR FairCarbon, le projet CarboNium. Il mobilisera plus de 50 chercheurs de 24 laboratoires, impliqués dans les infrastructures de recherche du CNRS et de l'INRAE (AnaEE, OZCAR, RZA, RéGEF, ILICO...)

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Dynamique spatio temporelle des émissions de méthane à l'interface des écosystèmes terrestres et aquatiques

Intégration du cycle du carbone à l'échelle des continuums

Impacts anthropiques sur la dynamique du carbone à l'interface des écosystèmes terrestres et aquatiques.

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Instrumentation in situ (mesure haute fréquences)

Soutien à l'observation de long terme (RH)

Modélisation du continuum

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

Synthèse exhaustive des données existantes des flux et stocks de C dans le continuum Terre Mer

Densification des mesures des formes du C dans les IRs nationales

Mesure hautes fréquences du CO₂ et du CH₄ depuis les milieux aquatiques continentaux et les estuaires

Modélisation du cycle du C dans le continuum Terre Mer.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Changement climatique

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Modélisation des systèmes SIC
Nom(s) et prénom(s)	P. Ackerer, B. Belfort, N. Lesparre, S. Weill
Adresse(s) mail	ackerer@unistra.fr , belfort@unistra.fr , lesparre@unistra.fr , sylvain.weill@engees.unistra.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	
Modélisation des systèmes SIC	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Le contexte

Les transferts et évolutions des observables hydrologiques, géochimiques, écologiques au sens large en SIC sont le résultat de forçages environnementaux et/ou anthropiques et de processus complexes, souvent fortement non-linéaires, variables dans l'espace et dans le temps et avec des temps caractéristiques pouvant aller de la seconde à plusieurs décennies voire davantage.

Le progrès des connaissances, l'évolution des moyens d'observation et l'augmentation des capacités de calcul ont conduit la communauté SIC à construire et utiliser des modèles de plus en plus sophistiqués (voir par exemple la modélisation des processus à l'interface sol/atmosphère). La pertinence de ces modèles, en termes de représentation des processus et des SIC et/ou en termes de réponse à une question (objectif de la modélisation) n'est pas toujours assurée et pose la question de la définition du 'bon' modèle dans sa conception (à base physique ou non, distribué ou non) et dans le choix des paramètres (parcimonie ou pas, déterministe ou statistique, ...).

Dans la dernière décennie, ce développement de modèles s'est accompagné de progrès importants dans le domaine de l'optimisation et des méthodes dites 'inverses' (ou d'identification). Il est maintenant possible de reproduire un jeu de données avec un modèle même si ce modèle est conceptuellement 'faux'. Bien souvent, l'erreur conceptuelle est alors compensée par une estimation erronée des paramètres calés. Cette compensation est rendue possible car plusieurs jeux de forçages/paramètres peuvent reproduire un jeu de données (non unicité).

Les observables SIC sont de nature très différente et représentent une variable ou paramètre moyenné sur le volume de mesure. Compte tenu de l'hétérogénéité du milieu naturel, il est indispensable de reconnaître que nous ne pourrions avoir qu'une connaissance partielle des informations nécessaires à la modélisation. Il est donc indispensable de considérer paramètres et variables dans un cadre conceptuel probabiliste.

Quelques pistes de recherche

Extraire un maximum d'information sur le site d'observation :

- en associant des données de nature différente (par exemple incorporer des données géophysiques/géochimiques/écologiques dans les modèles hydrologiques).
- En intégrant des données qualitatives dans les processus d'inversion/de calage (interpolation, utilisation conjointe d'indicateurs)
- En développant des outils d'interprétation et d'analyse issus de la théorie d'information (inférence bayésienne par exemple)
- En optimisant l'observation pour y extraire un maximum d'information (plan d'expériences)
- Analyser quelles observables, acquises suivant quel réseau permettent de réduire d'une part l'incertitude sur les paramètres et d'autre part l'incertitude sur les prédictions fournies par les modèles (data worth analysis)

Analyser et quantifier les effets des incertitudes sur les paramètres/variables sur les résultats des modèles (analyse de sensibilité par exemple).

Explorer l'ensemble des solutions possibles au calage d'un modèle (deep learning, optimisation dans un cadre statistique, ...).

Evaluer la fiabilité des prévisions de la modélisation en fonction des incertitudes et des informations disponibles.

Reboucler au niveau du plan d'expériences pour améliorer/optimiser les stratégies d'observations (quelles observables ? à quels endroits ? à quels moments ? durées – fréquences ?)

Ces perspectives de modélisation en SIC devraient être accompagnées par un renforcement des liens avec l'INSMI (Institut National des Sciences Mathématiques) via l'IMPT (Institut de Mathématique pour la Planète Terre) par exemple.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)

Evaluer notre connaissance, augmenter la fiabilité des prévisions dans un cadre probabiliste.

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

Méthodologique

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

N. P.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

1. Changement climatique
2. Intelligence artificielle
3. Santé et environnement

4. Territoires du futur
5. Transition énergétique

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	ALAMOD, PC1 PEPR FairCarboN
Nom(s) et prénom(s)	Barré Pierre, Kenji Fujisaki, Elisa Bruni, Bertrand Guenet, Tiphaine Chevallier, Christian Pichot, Antonio Bispo, Antoine Versini, Philippe Peylin
Adresse(s) mail	barre@geologie.ens.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	X
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	X
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	X
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Nous souhaitons faire part de réflexions que nous avons eues lors de l'écriture du PEPR FairCarboN et que nous avons lors de sa mise en œuvre concernant les mesures d'évolutions de stocks de carbone (sol et biomasse) dans les écosystèmes (projet ciblé 1, ALAMOD).

Les évolutions des stocks de C des écosystèmes continentaux ont et auront des conséquences significatives sur la teneur en CO₂ atmosphérique et donc sur le dérèglement climatique. Une compréhension plus fine de l'évolution des stocks et des flux aura également des impacts sur la stratégie nationale bas carbone qui se base en partie sur le stockage de C dans les écosystèmes. De nombreux modèles simulant les évolutions de stock de C dans les écosystèmes sur des pas de temps décennaux sont développés. Ces modèles visent à permettre de mieux prévoir le caractère puits ou source de C de différents écosystèmes (agro-systèmes, forêts etc.) à différentes échelles (parcelle, régions, globe) suivant différents scénarios de dérèglement climatique et de modification des changements d'usage et des pratiques de gestion. Pour valider la capacité de ces modèles à bien reproduire les systèmes qu'ils représentent et réduire donc les incertitudes sur les futurs scénarios de dérèglement climatique, il est nécessaire de les développer et tester avec des jeux de données présentant des évolutions de stock de C et des données associées appropriées sur des périodes les plus longues possibles, en tout cas supérieures à 10 ans.

Notre premier constat est que ces données sont dispersées, incomplètes et peu disponibles. Notre second constat, pour voir la bouteille à moitié pleine, est que l'écosystème de recherche français, avec ces partenaires, pourrait disposer d'un ensemble de jeux de données assez unique au monde en capitalisant sur les différents dispositifs existants permettant de disposer de jeux de données à l'échelle du site dans des contextes pédo-climatiques très variés (agro-systèmes et forêts au Nord et au Sud) et même à l'échelle du territoire métropolitain. Un des objectifs du projet ciblé 1 de FairCarboN (projet ALAMOD) est de recenser, compléter et mettre à disposition cet ensemble de jeux de données pour fournir un outil de benchmark incontournable pour les modèles d'écosystèmes.

De manière intéressante, les jeux de données mobilisés auront des origines très diverses. Certains viendront de sites suivis par une diversité d'infrastructures de recherche (IR) telles qu'AnaEE-France, In-Sylva, et ICOS. D'autres jeux de données, incontournables pour la question qui nous intéresse, ne sont pas issus de programmes opérés par des Organismes de Recherche ou des Universités mais par d'autres organismes français, par exemple le réseau RENECOFOR de l'ONF, l'Inventaire Forestier National de l'IGN ou encore le RMQS financé à 25% par l'ADEME. Au Sud, des jeux de données d'agrosystèmes tropicaux ont été constitués en collaboration avec des instituts et des universités partenaires.

Si cette diversité n'est pas un problème et peut même être source de partages d'expériences enrichissants, il nous semble important d'assurer l'harmonisation et l'inter-opérabilité de ces jeux de données, leur mise à disposition et de les porter à connaissance car ils constituent des outils particulièrement précieux. Nous espérons mener ce chantier à bien dans le cadre d'ALAMOD, en forte interaction avec les IR concernées et l'Equipex+ Gaia Data.

Par cette contribution, nous ne voulons pas seulement faire un peu de publicité au projet ALAMOD. Nous souhaitons également souligner qu'il nous semble capital de réussir à impliquer dans les réflexions sur l'observation au sens large la grande diversité d'acteurs produisant des données ou finançant leur acquisition, certains n'étant pas nécessairement dans les radars de la Prospective SIC (ONF, IGN, ADEME etc.). Nous aimerions que la prospective SIC du CNRS implique d'autres organismes et surtout nous aimerions la mise en place de protocoles permettant de fluidifier les

échanges de données entre les organismes. Ces échanges, même s'ils existent, reposent encore trop souvent sur la bonne volonté et l'énergie des équipes opérationnelles, mal ou pas formées pour parer aux difficultés administratives.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Ce type d'opérations nécessite des personnels compétents sur les bases de données. L'utilisation des jeux de données harmonisés sera plus efficace avec des data scientists brillants. La connaissance technique des bases de données doit être accompagnée de la connaissance même des données contenues dans les bases, type de données, origine, qualité, acquisition... Une vision intégrée de l'ensemble des organismes contribuant à l'alimentation des bases de données est également nécessaire pour une meilleure utilisation des bases de données et in fine une meilleure compréhension des stocks de C des SIC.

Pour tester la généralité des modèles, il est intéressant d'avoir des données issues de conditions pédo-climatiques contrastées. Avec ses implantations dans les pays du Sud, l'IRD et le CIRAD sont en bonne position pour maintenir et monter des collaborations scientifiques permettant de travailler sur des données de zones arides, semi-arides et tropicales. L'intégration de ces instituts permettra également d'assurer la mise en place de stratégies de validation des modèles en zones non-tempérées, avec une perspective de long-terme.

Capitaliser sur et renforcer l'existant (e.g., données, collaborations, échanges) puis encourager à son utilisation nous semble bien plus économique en carbone que de se lancer dans de nouvelles initiatives qui, sur ce sujet précis, ne porteront pas de fruits avant une dizaine d'années. Cette opération coûteuse en temps et en énergie doit être réalisée à travers une coordination nationale forte.

4/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Contribution, a minima, aux défis 1 (changement climatique) et 6 (transition énergétique)

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Les couvertures d'altération et le temps long
Nom(s) et prénom(s)	Thierry Allard, Guillaume Morin, Etienne Balan
Adresse(s) mail	thierry.allard@upmc.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	X
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	X
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) : Thèmes 19, 14, 11

La zone critique est profondément enracinée dans des évolutions passées souvent plus anciennes que le quaternaire, comme en zone intertropicale où l'évolution des sols peut intégrer des processus d'altération supergène sur plusieurs dizaines de millions d'années (Thème 19). Ainsi, les latérites, inféodées aux zones tropicales et équatoriales représentent environ 1/3 des continents émergés et 80 % du volume global des sols et constituent un compartiment dynamique intervenant dans le cycle de nombreux éléments. Les structures et compositions des profils d'altération constituent un héritage qui conditionne la dynamique des éléments majeurs ou traces métalliques et le fonctionnement actuel, dont la compréhension requière une analyse « historique ». Cela peut aider à comprendre et définir le "temps zéro" de la dispersion de contaminants de l'après-mine par exemple (Thème 11, Thème 14). Pour reconstituer le fonctionnement des profils d'altération qui ont pu subir plusieurs phases d'altération successives, la reconnaissance des diverses générations de minéraux secondaires, notamment à l'aide d'approches cristallochimiques, est essentielle. Par ailleurs, le temps long demeure important à considérer dans la mesure où il donne accès à des archives paléoclimatiques dans un contexte où plusieurs géochronomètres sont maintenant accessibles. Ils sont portés notamment par des phases secondaires des sols comme des oxydes de manganèse (datations ^{40}K - ^{40}Ar ou ^{40}Ar - ^{39}Ar), les oxydes et oxyhydroxydes de fer (datations (U-Th)/He), des argiles (datations par Résonance Paramagnétique Electronique, en développement). En complément, des outils de pointe sont de plus en plus utilisés pour révéler les processus d'altération (rayonnement synchrotron, microscopies de haute résolution, isotopes non traditionnels, diffractomètre à anode tournante...). Ces apports, marqués de jalons temporels et associés aux approches plus classiques, contribueront ainsi à enrichir peu à peu notre compréhension de l'évolution des surfaces continentales.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

- L'enregistrement de l'altération sur le temps long concerne en particulier les latérites au sens large, et donc une recherche dans les pays du Sud, bien que des reliques d'anciens climats existent aussi en zone actuellement tempérée.
- Les méthodes de datation absolue des phases secondaires des profils d'altération reposent sur des approches physiques, minéralogiques et géochimiques.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)

- *grandes périodes d'altération en relation avec les paléoclimats ou la géodynamique*

déduites des datations de minéraux secondaires des profils d'altération

- *évolution de l'altération dans les régions du globe, par exemple en Amérique du Sud et en Afrique*
- *reconstitution de la dynamique élémentaire, mise en place des contaminants au sein du profil d'altération*

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

- perfectionnement des méthodologies de datation des minéraux secondaires (argiles, oxydes de fer)
- recruter au CNRS sur le temps long dans les profils d'altération, face à l'extrême rareté de ce profil, qui contraste avec un passé à la pointe pour les chercheurs français dans le domaine des couvertures d'altération, domaine qu'il faut donc redynamiser.
- Partenariat avec les chercheurs de l'IRD (affectés sur place, connaissance des terrains, sujets de recherche complémentaires...)

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

- recruter des chercheurs et des ITA
- perfectionner les méthodes géochronologiques appliquées aux minéraux secondaires de la zone critique.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Approche intégrée Modélisation-Expérimentation-Analyse à l'échelle moléculaire
Nom(s) et prénom(s)	Blanchard Marc
Adresse(s) mail	marc.blanchard@get.omp.eu

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	X
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	X
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

La modélisation moléculaire en bio-géochimie se situe à une extrémité du spectre spatio-temporel étudié dans le domaine des Surfaces et Interfaces Continentales. C'est un outil privilégié qui, couplé à l'expérimentation et aux techniques d'analyse physico-chimique, permet d'appréhender les mécanismes et processus impliqués dans le fonctionnement des systèmes naturels. Cette approche mécanistique se base sur l'étude détaillée des interactions entre les différents composants (fluides, minéraux, matière organique, microorganismes) du système global complexe. Dans cette approche, la modélisation moléculaire offre l'avantage d'une meilleure interprétabilité du système à partir des lois de la physique. La contrepartie réside dans la difficulté d'agréger les résultats obtenus à ces petites échelles pour obtenir un modèle global. En cela, la modélisation moléculaire est complémentaire de celle basée sur les observations faites sur le système global.

L'évolution croissante de la résolution spatiale et de la sensibilité chimique des techniques d'analyses que ce soit en laboratoire ou associées au rayonnement synchrotron (microscopie, spectroscopie, spectrométrie et autres, avec différents systèmes d'échantillonnage comme l'ablation laser), ainsi que la complémentarité des expériences en laboratoire et des modélisations moléculaires, toutes deux réalisées en conditions parfaitement contraintes, permettent de comprendre les processus mis en jeu dans les cycles biogéochimiques des éléments, isotopes ou molécules. Cette approche permet d'explorer le rôle des processus à l'équilibre ou cinétique, des processus biotiques ou abiotiques afin de comprendre le fonctionnement et la dynamique du système. Parmi les nombreuses applications possibles, la communauté contribue très significativement à répondre aux enjeux des contaminants dans la Zone Critique et à ceux de la transition énergétique.

Comme listé ci-dessous dans les verrous et besoins, les principaux défis posés à la modélisation moléculaire correspondent (i) à se rapprocher davantage de la complexité physique, chimique des systèmes réels (compositions chimiques, interfaces solide-solution, systèmes désordonnés par exemple) ce qui revient déjà à augmenter la taille et la durée des simulations, (ii) à aller au-delà de l'étude des mécanismes à l'équilibre et explorer les mécanismes cinétiques, les chemins réactionnels, et enfin (iii) à changer d'échelle pour tendre vers une modélisation du système global. La complémentarité Modélisation-Expérimentation offre déjà une piste de réponse aux deux premières difficultés en testant la validité des modèles simples. Une nouvelle piste émerge avec l'arrivée des méthodes numériques d'Intelligence Augmentée (IA), et en particulier des méthodes « machine learning » pour la modélisation des matériaux. Ces méthodes sont mises en œuvre pour construire des potentiels interatomiques empiriques peu gourmands en termes de ressources informatiques et dont l'utilisation ultérieure permet d'accroître considérablement la taille et la durée des simulations. D'autres techniques avancées de dynamique moléculaire peuvent permettre d'étudier les cinétiques réactionnelles de manière efficace. Et certaines communautés scientifiques (comme en pharmacologie) tirent profit des méthodes d'IA pour explorer de nouveaux matériaux aux propriétés souhaitées.

Pour aller dans cette direction, une veille méthodologique des autres disciplines doit être réalisée et les projets de recherche seront interdisciplinaires. Cela nécessite que les chercheurs « SIC » développent un savoir-faire technique en modélisation suffisant pour dialoguer et s'adapter aux évolutions rapides des méthodes et moyens de calcul.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

/

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

En modélisation moléculaire, les principaux verrous sont les suivants :

- Augmenter de la complexité des systèmes modélisés (complexité chimique, interfaces solide-liquide, systèmes désordonnés)
- Passer des mécanismes à l'équilibre aux mécanismes cinétiques, aux chemins réactionnels
- Changer d'échelle spatio-temporelle

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Méthodologie : Promouvoir le dialogue entre modélisateurs et expérimentateurs, mais aussi entre modélisateurs « SIC » et modélisateurs en physique, chimie, biologie. Intégrer les techniques d'Intelligence Augmentée, de « machine learning » liées à la modélisation moléculaire (construction de potentiels interatomiques, échantillonnage accéléré, prédiction de propriétés).

RH/Métier : Développer un savoir-faire technique en modélisation pour s'adapter aux évolutions rapides des méthodes et moyens de calcul. Être attractif pour les étudiants d'autres disciplines.

Moyens : Accès aux TGIR que sont les centres de calcul intensif (type GENCI) et les synchrotrons.

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

L'approche décrite dans cette contribution peut entrer dans les défis sociétaux liés au changement climatique et à la transition énergétique, de par les applications suivantes (liste non exhaustive) :

- Étude du climat passé par la compréhension du fonctionnement des proxy, et par l'interprétation des archives sédimentaires
- Étude des contaminants notamment dans le contexte de la qualité de l'eau
- Étude géochimique de ressources minérales, des réactions impliquées dans le captage, stockage et valorisation du CO₂

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Intégrer les enjeux environnementaux aux recherches sur les SIC
Nom(s) et prénom(s)	Cécile Albert, Nicolas Champollion, Mathieu Chassé, Karin Dassas, Émilie Dassié, Maxime Debret, Simon Gascoin, Laure Guérit, Françoise Immel, Emilie Jardé, Laurent Jeanneau, Jean Kempf, Sylvain Kuppel, Valérie Le Dantec, Sylvie Massemin, Arnaud Mialon, Odin Marc, Anne Mone, Benjamin Musnier, Thierry Pellarin, Christophe Peugeot, Irene Schimmelpfennig, Tiphaine Tallec
Adresse(s) mail	cecile.albert@imbe.fr , nicolas.champollion@univ-grenoble-alpes.fr , mathieu.chasse@sorbonne-universite.fr , karin.dassas@univ-tlse3.fr , emilie.dassie@u-bordeaux.fr , maxime.debret@univ-rouen.fr , simon.gascoin@univ-tlse3.fr , laure.guerit@univ-rennes.fr , francoise.immel@univ-fcomte.fr , emilie.jarde@univ-rennes.fr , laurent.janneau@univ-rennes.fr , jean.kempf@cefe.cnrs.fr , sylvain.kuppel@ird.fr , valerie.le-dantec@univ-tlse3.fr , sylvie.massemin@iphc.cnrs.fr , arnaud.mialon@univ-tlse3.fr , odin.marc@get.omp.eu , anne.mone@uca.fr , benjamin.musnier@univ-lr.fr , thierry.pellarin@univ-grenoble-alpes.fr , christophe.peugeot@ird.fr , schimmel@cerege.fr , tiphaine.tallec@univ-tlse3.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2- Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constante	
3- Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4- Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5- Des outils aux données et aux connaissances	
6- La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7- Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9- Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10- Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11- Les contaminants de la Zone Critique	
12- Le continuum Homme/Terre/Mer	

13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) : Intégrer les enjeux environnementaux aux recherches sur les SIC	x

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les impacts environnementaux de nos sociétés de consommation ne sont plus à démontrer et plusieurs d'entre eux dépassent les seuils garantissant l'habitabilité de la planète pour notre espèce¹. Les transitions rapides de nos sociétés vers un mode de vie plus durable sont non seulement nécessaires mais urgentes. Elles ne peuvent se passer d'une réflexion pour les rendre à la fois justes, équitables et désirables.

La recherche telle qu'elle est menée aujourd'hui contribue pleinement à l'accélération de la surconsommation d'énergie et la surexploitation des ressources. Les transitions auxquelles nos sociétés doivent faire face concernent aussi le monde de la recherche. Le comité d'éthique du CNRS a souligné l'importance de la dimension éthique de la prise en compte de ces enjeux environnementaux dans la recherche avec deux aspects complémentaires. Le premier porte sur les objets de recherche et le deuxième sur la manière dont elles sont faites. La communauté des Surfaces et Interfaces Continentales développe des travaux de recherche qui vont dans le sens d'une meilleure compréhension du fonctionnement du système Terre et de l'impact des activités humaines sur celui-ci. Les objets de nos recherches ont l'ambition de répondre aux enjeux environnementaux. Dans un souci d'exemplarité, notre communauté doit aussi prendre en compte ses propres impacts sur l'environnement. Notre communauté doit travailler sur ses méthodes et ses pratiques pour développer une recherche soutenable sur les SIC et rendre possible les transitions de nos métiers.

Ce contexte doit être pris en considération le plus rapidement possible par l'ensemble de la communauté de manière à conserver notre crédibilité vis-à-vis des différents acteurs sociétaux dans notre capacité à accompagner les mutations nécessaires de nos sociétés et ce dans un souci d'exemplarité. Il nous faut accepter que cela signifie une modification de nos manières d'observer le système Terre et de créer de nouvelles connaissances. Bien que cette période de transitions puisse être source d'incertitudes et de mal-être, il s'agit aussi d'une formidable opportunité de mobiliser nos compétences de créativité et d'innovation en expérimentant de manière réflexive et collective ce que pourrait être une recherche « frugale » ou « sobre », tout en garantissant une bonne qualité de vie au travail à l'ensemble des personnels. C'est le défi de la communauté SIC et de l'ensemble des communautés scientifiques.

Le but de cette proposition est de provoquer des discussions sur l'intégration de la dimension environnementale dans les recherches menées sur les SIC via deux axes de réflexion complémentaires : (i) les pratiques au sein des laboratoires et (ii) la politique de recherche institutionnelle. Les proposant-e-s font partie des groupes Développement Durable et Responsabilité Sociétale de plusieurs UMR rattachées à la section 30 du CoNRS. Cette proposition est à coordonner avec la fiche intitulée « Perception des interactions recherche-société par le personnel de recherche : un exemple dans la communauté de modélisation des surfaces continentales ».

¹ Rockström et al., Nature, 619, 102-111, 2023 ; Persson et al., ES&T, 56, 1510-1521, 2022.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Cette proposition de thème correspond aux aspects transverses « formation », « RH/métiers », « recherche bas carbone » et « responsabilité environnementale ». Elle ne vient pas en substitution à la déclinaison demandée de ces aspects dans les différentes contributions mais il nous semble important que cette intégration fasse l'objet d'un chapitre dédié et clairement identifié de la prospective SIC, à l'instar de la prospective scientifique de l'INP, pour appuyer le fait que l'intégration de ces enjeux est dès aujourd'hui indispensable voire primordiale pour le développement des recherches sur les SIC.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ?

Les verrous sont à la fois psychologiques et méthodologiques. Nos biais cognitifs et notre système de valeurs, de croyances définissent ce que nous percevons comme une recherche de qualité. Il est de plus en plus évident que cet ensemble de valeurs, favorisant l'individualisation et la compétition et valorisant les dépenses matérielles et les déplacements professionnels entre en contradiction avec les transitions nécessaires vers un mode de vie durable, créant des situations de dissonance cognitive. Il semble important dans ce contexte de rendre enviable cette organisation de la recherche post-transition. Plusieurs verrous existent pour répondre à ces situations. Ils concernent trois groupes d'actions.

Renseigner : Il nous faut quantifier les empreintes environnementales de nos activités de recherche à l'échelle des disciplines, et ce au-delà de l'empreinte carbone, pour cibler les leviers les plus efficaces à actionner pour adapter ces disciplines aux conditions d'exercice d'une société post-transition.

Développer : Il nous faut adapter les protocoles pour réduire voire éviter nos impacts environnementaux (émissions de gaz à effet de serre, exploitation des ressources naturelles, humaines...).

Questionner : Il nous faut questionner, de l'échelle individuelle à celle des institutions, notre manière de concevoir l'activité de recherche scientifique et notre manière de percevoir la qualité de la recherche.

Quels besoins ?

De telles transformations doivent s'inscrire sur la durée. Elles doivent être clairement cadrées et appuyées par les tutelles. Les organismes de recherche doivent reconnaître leur part de responsabilité dans l'accélération et l'internationalisation de la recherche. Ils doivent, à travers leurs feuilles de route stratégiques, favoriser l'émergence d'un modèle de recherche sobre et durable. Ils doivent ainsi modifier les modes d'évaluations quantitatifs de

la recherche (projets, indicateur, financement). Ce cadre institutionnel clair est nécessaire à l'adhésion de l'ensemble de la communauté.

Il est important d'intégrer ces transformations dans la formation initiale des étudiants comme souligné dans le rapport Jouzel-Abbadie² (2020) et de les développer lors du master et du doctorat. Il conviendra d'accompagner les collègues à travers la formation continue mais aussi en intégrant ces réalités dans les jurys de concours, les évaluations individuelles et collectives. L'investissement des volontaires (type référent.e.s DD) doit être officiellement valorisé.

De telles transformations ont besoin de moyens pérennes. Cependant il ne s'agit pas ici de demander plus de moyens pour la recherche car il nous faudra dépenser moins pour réussir ces transitions. L'urgence environnementale et la nécessité d'une mutation rapide de nos sociétés justifient une réorientation forte des budgets vers les objectifs de développement d'une recherche répondant à l'ambition des transitions écologiques. Ce développement doit être un critère important dans le choix des financements de projets (nécessité de transformer nos manières de travailler), en terme de recrutements (nécessité de recruter sur poste permanent pour valoriser les investissements de formation et d'équipement ; nécessité de recruter des personnes qui intègrent les enjeux environnementaux dans leur futur professionnel), et en terme de structuration de la communauté (les infrastructures de recherche comme REGEF sont un exemple de mutualisation à développer).

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

Ces trois tâches doivent permettre de faire évoluer de concert et de manière coordonnée (i) les pratiques au sein des laboratoires et (ii) la politique de recherche institutionnelle (financement, évaluation, ressources humaines).

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Cette proposition de thème, en appelant à développer une recherche scientifique en accord avec une société post-transition fait écho à au moins 5 des 6 défis sociétaux identifiés par le CNRS à savoir les changements climatiques, la santé et l'environnement, les territoires du futur et la transition énergétique. Au-delà des questions de recherche, cette proposition de thème appelle à une modification de notre manière de concevoir et de faire de la recherche scientifique.

² <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/enseigner-la-transition-ecologique-dans-le-superieur-51505>

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Paléo-indicateurs, contaminants et énergie
Nom(s) et prénom(s)	Morin Guillaume
Adresse(s) mail	Guillaume.morin@sorbonne-universite.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	x
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	x
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	x
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	x
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	x
13-Le continuum biotique/abiotique	x
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	x
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	x
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	x
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	x
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Thèmes 3, 7, 11, 12, 13, 14, 16 et 17 : La calibration des paléo-indicateurs

L'étude du fonctionnement des sédiments et des sols actuels jusqu'aux échelles moléculaire est indispensable pour calibrer les indicateurs paléo-environnementaux minéralogiques, chimiques, isotopiques qui renseignent sur les paramètres climatiques, redox, biologiques et anthropiques du passé. Par son expertise sur le fonctionnement biogéochimique des systèmes de basse température, qu'ils soient continentaux, côtiers ou marins, la communauté SIC est en mesure d'apporter des informations nouvelles sur, par exemple, l'origine des fractionnements isotopiques, la composition chimique des océans et des lacs anciens, l'intensité de l'altération continentale, la température des masses d'eau et ce jusqu'à des périodes qui intéressent aussi la communauté de la Terre Solide, de l'Archéen à nos jours. La calibration précise des fonctions de transferts entre les paramètres environnementaux et leurs indicateurs (proxies) nécessite de développer des approches nouvelles, aux échelles moléculaires, chimiques et biologiques, sur des systèmes de laboratoire ainsi que sur des réacteurs naturels bien caractérisés et instrumentés.

Thèmes 11, 12, 13, 14 : La chimie radicalaire dans les sols et les sédiments.

Un domaine émergent au plan international concerne la détection, la compréhension et la prise en compte des réactions radicalaires dans les environnements de surface. Si la photochimie est étudiée depuis longtemps, de même que certains procédés de type Fenton pour la dépollution, les réactions radicalaires naturelles, à l'abri de la lumière, dans les sols, les sédiments et les nappes sont encore très mal connues. Elles peuvent intervenir lors des processus redox abiotiques et biotiques avec des synergies possibles. La détection et la quantification de ces réactions nécessite de développer des approches analytiques nouvelles pour les SIC qui doivent être couplées avec des techniques fines de caractérisation des composés organiques et inorganiques. Ceci afin d'évaluer le rôle de ces réactions sur le devenir à long terme de la matière organique naturelle et des polluants. Les environnements côtiers et les zones humides, particulièrement propices aux cycles redox sont des cibles prioritaires pour ces recherches.

Thème 3, 21, 16, 17 : la production d'énergie à basse température

La fixation du CO₂ par des réactions biotiques et abiotiques éventuellement synergiques, est au cœur d'un très large effort de recherche qui dépasse la communauté SIC. Néanmoins l'expertise des SIC dans la compréhension des réactions aux interfaces solide-solutions-microorganismes est un atout important pour contribuer à la recherche sur la production de (bio)carburants et bio(gaz) (fermentation, photosynthèse artificielle) et d'électricité (biopiles) à basse température. L'identification de composés réactifs naturels ou inspirés des minéraux naturels, couplée à la mise en œuvre de réactions redox catalysées par des micro-organismes pourrait apporter des éclairages nouveaux dans ce domaine en très forte expansion au plan international.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

Dans les trois thèmes proposés ici, le développement de méthodes numériques (DFT, Dynamique moléculaire) et spectroscopiques (e.g. résonances magnétiques, Synchrotron, spectroscopie de masse) est essentiel pour comprendre les mécanismes réactionnels en jeu à l'échelle atomique. Ceci afin de remonter aux paramètres cinétiques et thermodynamiques des réactions et de leurs produits.

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

qualité de l'eau, climat

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Evolution de la ressource en eau dans les bassins anthropisés
Nom(s) et prénom(s)	Groupe Eau du CESBIO (contact : Olivier Merlin)
Adresse(s) mail	Olivier.merlin1@univ-tlse3.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	X
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

L'accès à l'eau est crucial pour l'habitabilité des territoires. Et l'eau étant un bien commun, son partage pour les différents usages doit faire l'objet de concertations avec l'ensemble des parties prenantes : eau potable, irrigation, industrie, production d'électricité, santé des êtres vivants et des écosystèmes, tourisme, navigation, etc.. Comprendre et représenter les effets des activités humaines et du changement climatique sur la disponibilité quantitative et qualitative de la ressource en eau est un donc enjeu majeur de nos sociétés.

Anticiper les évolutions possibles de la ressource à l'échelle des bassins versants anthropisés est d'ailleurs un sujet de recherche au croisement de 5 parmi les 6 grands défis sociétaux identifiés dans le dernier COP du CNRS : Changement climatique (qui exacerbe les tensions sur une ressource limitée), Intelligence artificielle (ex. apprentissage automatique basé sur la donnée et accès rapide à une information pertinente), Santé et environnement (risque chimique et microbiologique de l'eau), Territoires du futur (vers des solutions de gestion optimisée de la ressource avec les préoccupations des citoyens), et Transition énergétique (à travers le nexus eau-énergie).

Ces défis demandent une recherche très inter-disciplinaire qui permette l'intégration de nos connaissances sur le fonctionnement socio-hydrologique des bassins versants. Les socio-hydrosystèmes représentent les bassins versants par une approche systémique, où les interactions entre les éléments constitutifs naturels ou anthropiques peuvent être prises en compte à différentes échelles spatiales et temporelles. Par modélisation hydrologique intégrée, nous faisons référence ici à l'intégration des différents composants des hydrosystèmes (ex. amont-aval, surface-souterrain, montagne-plaine, etc.) et éventuellement à l'association de thématiques diverses (ex. hydrologie-SHS, hydrologie-santé, hydrologie-énergie, etc.) nécessaires pour répondre aux questions posées par les défis pré-cités.

Le groupe Eau du CESBIO a pour objectif d'améliorer notre compréhension du fonctionnement des socio-hydrosystèmes, avec présence d'agriculture irriguée et de stockage d'eau, et de proposer des outils pour contribuer à une gestion durable de la ressource. A l'échelle locale, les mesures de terrain servent à la compréhension des déterminants des flux d'eau et ainsi à contribuer à lever les équifinalités sur la partition de certains flux au sein des outils de modélisation (évapotranspiration/drainage, fonte/sublimation, transpiration/évaporation). La spatialisation de ces flux au bassin versant passe par l'utilisation conjointe de l'observation satellitaire et de modèles agro-hydrologiques. Nos modèles intègrent les cartes d'occupation des sols, les étendues et volumes d'eau stockée dans des retenues, le développement de la végétation et son état hydrique, l'humidité des sols et la couverture neigeuse. Ces plateformes de modélisation-observation permettent une estimation spatialisée améliorée de certains flux hydrologiques incertains (tels que l'évapotranspiration, la fonte de la neige ou le drainage) à l'échelle de la parcelle agricole, du périmètre irrigué et du bassin versant, et l'évaluation de leur contribution aux variations du débit des rivières et du niveau des nappes. De manière plus originale, nous menons aussi des développements méthodologiques sur l'estimation des forçages tels que l'irrigation, grandeur incertaine à l'échelle parcellaire pourtant capitale à la fois pour améliorer la représentation des activités anthropiques dans les modèles intégrés (cf axe 3) mais aussi pour l'ensemble des acteurs de la gestion de l'eau de l'agriculteur au gestionnaire de territoire.

Les recherches proposées par le groupe Eau du CESBIO pour les 5 années à venir se déclinent autour de 3 objets aux questionnements scientifiques spécifiques : 1) hydrologie de plaine 2) hydrologie de montagne et 3) modélisation intégrée à l'échelle du bassin versant en lien avec la productivité des cultures et la santé des êtres vivants et les écosystèmes.

L'axe 1 « Hydrologie de plaine » s'intéresse principalement à la caractérisation de l'évapotranspiration (Wanniarachchi et al. 2022 ; Elfarkh et al. 2022), du stress hydrique (Tolomio et al. 2020), et de l'irrigation (McDermid et al. 2023 ; Massari et al. 2021) des cultures, et à l'évaluation de l'impact des pratiques agricoles (irrigation, couverts intermédiaires, fertilisation, etc.) sur le fonctionnement hydrique des parcelles (Scopel et al. 2013 ; Alletto et al. 2022). Spécifiquement, le questionnement est :

- Dans quelle mesure la prise en compte du stress hydrique des végétaux améliore l'estimation de l'évapotranspiration ?
- Quel niveau de complexité de la modélisation du bilan hydrique et quelles données satellitaires choisir pour estimer l'irrigation de manière précise et fiable ?
- Quels effets les cultures intermédiaires ont-elles sur le bilan d'eau d'une parcelle selon les conditions météorologiques (répartition des pluies) ?
- Quelle représentation des pratiques agricoles dans les outils de modélisation pour une bonne représentation des usages ?

L'axe 2 « Hydrologie de montagne » s'intéresse principalement à la caractérisation de l'équivalent en eau du manteau neigeux à partir des données satellitaires et de réanalyse météorologiques et climatiques (Margulis et al. 2016 ; Alonso-González et al. 2022), et à la fermeture du bilan d'eau des bassins versant à l'aide de données spatiales de l'évapotranspiration (Senay et al. 2016) incluant des zones de montagne (Malbêteau et al. 2017). Spécifiquement, le questionnement est :

- Comment reconstruire l'équivalent en eau du manteau neigeux dans les massifs Méditerranéens (Atlas, Liban, Pyrénées) sur une période pluri-décennale ?
- Comment estimer l'évapotranspiration en montagne ?
- Peut-on estimer le terme d'infiltration (encore inconnu en montagne) par terme résiduel du bilan d'eau contraint par des estimations d'évapotranspiration ?

L'axe 3 « Modélisation intégrée à l'échelle du bassin versant en lien avec des défis sociétaux » relie les activités des axes 1 et 2 au sein des socio-hydrosystèmes et vise à prendre en compte les activités humaines (petit cycle de l'eau) dans la représentation du grand cycle de l'eau des surfaces continentales (Abbott et al. 2019, Ouassanouan et al. 2022). Il s'agit en particulier d'évaluer l'impact des pratiques d'irrigation sur les cours d'eau de surface (Brochet et al. 2023) et souterrains (Laluet et al. 2023) et l'impact du drainage agricole sur la santé des êtres vivants et des écosystèmes (Blann et al. 2009). Pour atteindre ces objectifs, des données multi-source à haute résolution spatiale seront assimilées dans un modèle hydrologique (Alfieri et al. 2022) avec un focus particulier sur les variables anthropiques afin de prendre en compte l'impact des changements anthropiques et climatiques sur le fonctionnement hydrologique. En pratique, les activités de l'axe 3 sur les 5 années à venir s'insèrent dans deux programmes de recherche collaborative à l'échelle nationale autour de deux questions de sciences-sociétés :

1) Quelles solutions (transitions agro-écologiques) pour une gestion durable des ressources en eau dans les agro-écosystèmes ?

2) Quel est le risque de transmission des maladies infectieuses par l'eau agricole (approche « One Health ») ?

1) Un consortium (projet GI-EAU, GIS Eau Toulouse) a été récemment constitué d'équipes toulousaines, nationales et internationales pluridisciplinaires travaillant sur la gestion des ressources en eau pour l'agriculture à l'échelle des territoires (sous bassins versants, périmètres de gestion). Au

sein de ce consortium, nous souhaitons nous appuyer sur une approche interdisciplinaire et multi-modèles pour participer au développement de solutions à la préservation quantitative et qualitative de la ressource en eau. Il s'agira d'élaborer, via des approches participatives impliquant les acteurs (chercheurs, élus, associations et collectivités territoriales), des scénarios d'usage de la ressource visant à réduire la demande et la consommation en eau tout en recherchant un consensus parmi les différents acteurs. Dans cet objectif général, notre questionnement est :

- Quel est l'impact des prélèvements (irrigation) sur les ressources en eau de surface (débits) et souterraines (hauteurs des nappes) à l'échelle des territoires ?
- Quels sont les déterminants des pratiques d'irrigation (politiques publiques, économique, logistique, qualité de l'eau et des sols, foncier, événements extrêmes, etc.) et comment les représenter numériquement pour proposer des scénarios d'évolution des ressources ?

2) Une proposition en cours (PEPR PREZODE WAVE), issue d'une nouvelle synergie entre les travaux du laboratoire de virologie du CHU de Toulouse et ceux d'autres laboratoires dont le CESBIO s'insère pleinement dans le défi sociétal « Santé et environnement ». Dans la région Occitanie, on observe une forte séroprévalence du virus de l'hépatite E (VHE). Cependant, il existe une grande hétérogénéité de la séroprévalence selon les départements. Le VHE présent en Occitanie étant zoonotique (se transmet des animaux aux humains), l'hypothèse à tester dans ce projet est que le VHE se diffuse par l'eau depuis les sources potentielles (élevages extensifs, épandage de lisier, animaux sauvages) vers les points de captage d'eau potable via les différents réseaux : réseau hydrographique naturel (surface et souterrain), réseau de drainage agricole, réseau d'eau potable, et réseau des eaux usées. Au sein de ce projet, notre questionnement est :

- Quelle est la partition entre les eaux naturelles (exemptes de VHE), les eaux issues du drainage agricole ou diffusées depuis les réservoirs de faune sauvage (sites potentiels de contamination au VHE), et les eaux usées traitées (vecteur potentiel de contamination) à l'échelle du sous-bassin versant ?
- Comment spatialiser cette partition des flux à l'échelle de l'Occitanie ?

Références :

Abbott, B. W., Bishop, K., Zarnetske, J. P., Minaudo, C., Chapin III, F. S., Krause, S., ... & Pinay, G. (2019). Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. *Nature Geoscience*, 12(7), 533-540.

Alfieri, L., Avanzi, F., Delogu, F., Gabellani, S., Bruno, G., Campo, L., Libertino, A., Massari, C., Tarpanelli, A., Rains, D., Miralles, D. G., Quast, R., Vreugdenhil, M., Wu, H., and Brocca, L.: High-resolution satellite products improve hydrological modeling in northern Italy, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26, 3921–3939, <https://doi.org/10.5194/hess-26-3921-2022>, 2022.

Alletto, L., Cueff, S., Bréchemier, J., Lachaussée, M., Derrouch, D., Page, A., ... & Bustillo, V. (2022). Physical properties of soils under conservation agriculture: A multi-site experiment on five soil types in south-western France. *Geoderma*, 428, 116228.

Alonso-González, E., Aalstad, K., Baba, M. W., Revuelto, J., López-Moreno, J. I., Fiddes, J., Essery, R., and Gascoin, S. (2022) The Multiple Snow Data Assimilation System (MuSA v1.0), *Geosci. Model Dev.*, 15, 9127–9155, <https://doi.org/10.5194/gmd-15-9127-2022>

Blann, K. L., Anderson, J. L., Sands, G. R., & Vondracek, B. (2009). Effects of agricultural drainage on aquatic ecosystems: a review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 39(11), 909-1001.

Brochet, E., Sauvage, S., Grusson, Y., Lhuissier, L., & Demarez, V. (2023). How to account for irrigation withdrawals in a watershed model. *EGUsphere*, 2023, 1-25. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-494>

Elfarkh, J., Simonneaux, V., Jarlan, L., Ezzahar, J., Boulet, G., Chakir, A., & Er-Raki, S. (2022). Evapotranspiration estimates in a traditional irrigated area in semi-arid Mediterranean. Comparison of four remote sensing-based models. *Agricultural Water Management*, 270, 107728.

Laluet, P., Olivera-Guerra, L., Altés, V., Rivalland, V., Jeantet, A., Tournebize, J., Cenobio-Cruz, O., Barella-Ortiz, A., Quintana-Seguí, P., Villar, J. M., and Merlin, O. (2023b). Drainage assessment of irrigation districts: on the precision and accuracy of four parsimonious models, *EGUsphere* [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-543>, 2023.

McDermid, S., Nocco, M., Lawston-Parker, P., Keune, J., Pokhrel, Y., Jain, M., ... & Yokohata, T. (2023). Irrigation in the Earth system. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1-19.

Malbêteau, Y., Merlin, O., Gascoin, S., Gastellu, J. P., Mattar, C., Olivera-Guerra, L., ... & Jarlan, L. (2017). Normalizing land surface temperature data for elevation and illumination effects in mountainous areas: A case study using ASTER data over a steep-sided valley in Morocco. *Remote Sensing of Environment*, 189, 25-39.

Margulis, S. A., Cortés, G., Giroto, M., and Durand, M.: A Landsat-Era Sierra Nevada Snow Reanalysis (1985–2015), *J. Hydrometeor*, 17, 1203–1221, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0177.1>, 2016.

Massari, C., Modanesi, S., Dari, J., Gruber, A., De Lannoy, G. J., Giroto, M., ... & Brocca, L. (2021). A review of irrigation information retrievals from space and their utility for users. *Remote Sensing*, 13(20), 4112.

Ouassanouan Y., Fakir Y., Simonneaux V., Hakim Kharrou M. H., Bouimouass H., Najar I., Benrhanem M., Sghir F., Chehbouni A., 2022, Multi-decadal analysis of water resources and agricultural change in a Mediterranean semiarid irrigated piedmont under water scarcity and human interaction, *Science of The Total Environment*, Volume 834, 155328, ISSN 0048-9697, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155328

Scopel, E., Triomphe, B., Affholder, F., Da Silva, F. A. M., Corbeels, M., Xavier, J. H. V., ... & De Tourdonnet, S. (2013). Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. *Agronomy for sustainable development*, 33, 113-130.

Senay, G. B., Friedrichs, M., Singh, R. K., & Velpuri, N. M. (2016). Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. *Remote Sensing of Environment*, 185, 171-185.

Tolomio, M., & Casa, R. (2020). Dynamic crop models and remote sensing irrigation decision support systems: A review of water stress concepts for improved estimation of water requirements. *Remote Sensing*, 12(23), 3945.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Les activités se basent sur des sites très divers (gradients Nord-Sud et Est-Ouest, diversité des climats, des systèmes de culture) et instrumentés pour le suivi long terme (importantes activités de calibration/validation, développement de capteurs, physique du signal).

Grâce à la télédétection, les travaux de recherche portent également sur des échelles spatiales très variées (instrumentation, parcelle agricole, petit bassin, grand bassin versant), ce qui permet un suivi et une analyse multi-échelle des processus socio-hydrologiques.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- Caractérisation et modélisation des activités humaines (stockage, pompage, irrigation, drainage) au sein du grand cycle
- Déterminants des partitions de flux évapotranspiration/drainage, transpiration/évaporation, fonte/sublimation
- Spatialisation des propriétés hydrodynamiques indispensables à une bonne représentation de la partition ruissellement/infiltration au sein des bassins versants jaugés et non-jaugés
- Faible densité des réseaux d'observations et discontinuité des séries temporelles
- Caractérisation des transferts souterrains et des interactions surface-nappe

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- Observations de terrain : maintenance des réseaux de stations pour assurer la continuité des observations; densification des réseaux de capteurs à l'échelle du paysage (ex. développement et déploiement de capteurs à bas coût) ; sciences participatives.
- Modélisations : modèle de manteau neigeux ; modèle hydrologique SWAT ; modèle de bilan d'eau des cultures FAO-56 ; modèle agronomique STICS incluant toute la complexité de croissance des cultures ; modèles de bilan d'énergie de la surface ; une approche multi-modèle pourrait être souhaitable pour permettre une approche multi-échelle (station de mesure, parcelle, sous-bassin, bassin versant) et une inter-validation des modèles par up- et down-scaling.
- Données spatialisées : outils de désagrégation des données de réanalyse climatiques ; prétraitement des données (produits de télédétection type THEIA, carte des sols, météo, etc.) d'entrée des modèles dans des formats et échelles uniformes pour une intégration automatique dans les modèles et pour tester la robustesse des approches sur différents territoires ; potentiellement le même type de post-traitement sur les sorties des différents modèles

hydrologiques utilisés pour avoir une cohérence relative et aider à l'inter-comparaison des modélisations.

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Anticiper les évolutions possibles de la ressource à l'échelle des bassins versants anthropisés est un sujet de recherche au croisement de 5 parmi les 6 grands défis sociétaux identifiés dans le dernier COP du CNRS : Changement climatique (qui exacerbe les tensions sur une ressource limitée), Intelligence artificielle (ex. apprentissage automatique basé sur la donnée et accès rapide à une information pertinente), Santé et environnement (risque chimique et microbiologique de l'eau), Territoires du futur (vers des solutions de gestion optimisée de la ressource avec les préoccupations des citoyens), et Transition énergétique (à travers le nexus eau-énergie).

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Valorisation des terres excavées en génie pédologique
Nom(s) et prénom(s)	Hubert Fabien & Coussy Samuel
Adresse(s) mail	fabien.hubert@univ-poitiers.fr / S.Coussy@brgm.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	X
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

La « zone critique urbaine et péri-urbaine » est une thématique dans laquelle nous souhaiterions contribuer concernant le devenir des terres excavées issues du développement du tissu urbain. Les terres excavées sont des matériaux dont la gestion pose question en milieu urbain, particulièrement lorsque les chantiers en génèrent des volumes conséquents qu'il est impossible de gérer sur site. Ainsi, lorsque la réutilisation des terres excavées en génie civil ne s'avère pas propice sur site à cause de leurs propriétés géotechniques non adaptées, ces terres sont évacuées hors site. Les terres excavées sortant de leur site d'excavation prennent le statut réglementaire de « déchets », et sont à ce titre généralement éliminées dans des installations de stockage de déchets ou remblayées dans des carrières. Les terres excavées gérées hors sites constituent l'un des déchets majoritaires en France (autour de 150 millions de tonnes de terres par an). Des alternatives pour la valorisation de ces matériaux naturels sont envisagées en génie civil, notamment leur utilisation pour l'élaboration/ la formulation de matériaux de construction. Si cette approche reste pertinente dans une optique de recyclage des terres excavées pour leur réutilisation directe en génie civil, elle réintroduit des matériaux naturels issus de la zone critique dans un cycle de vie orienté vers la construction. De plus, elle ne permet de recycler qu'une faible proportion de la totalité des volumes générés. Or, les potentialités des terres excavées pourraient permettre leur réutilisation vers un cycle naturel en créant, à partir des matériaux extraits, les conditions de surface favorable au développement du vivant, un sol. L'approche est déjà largement étudiée et s'inscrit dans le domaine émergent du génie pédologique dont l'objectif applicatif est de reconstituer ou créer des sols fertiles à l'aide de matériaux provenant de déchets urbains, dont les terres excavées. On parle alors dans ce cas de construction de Technosols, selon le référentiel pédologique de la FAO.

Bien que le génie pédologique se développe essentiellement dans le secteur de l'ingénierie, la recherche sur ce sujet existe depuis plusieurs années, et porte notamment sur le devenir dans le temps de ces Technosols. Les approches actuelles en construction de Technosols miment la structuration naturelle des sols en horizons. Les études portent sur l'évolution à court et moyen terme de ces sols construits, ainsi que leur capacité à permettre le développement du vivant. Même si des phénomènes attribuables à la pédogenèse comme des processus d'agrégation, de décarbonatation, de colonisation par les racines et d'activité microbienne variables en fonction de la profondeur ont pu être mis en évidence, la compréhension de ces mécanismes reste à explorer afin d'améliorer et de généraliser les solutions qui pourront être apportées. Un élément marquant reste néanmoins la quantité généralement très importante d'apport en matières organiques en surface afin de permettre la mise en place d'un couvert végétal. Ce point reste problématique car une partie conséquente du carbone organique apporté sous cette forme se minéralise rapidement. Or, l'augmentation de la séquestration du carbone, ou du moins l'augmentation de son temps de résidence dans les sols, est un objectif majeur dans un contexte d'adaptation au changement climatique afin de limiter le transfert de carbone vers l'atmosphère. Ainsi, la poursuite de la réflexion sur ce domaine semble relever des prérogatives de la SIC, pour ses aspects fondamentaux et les connaissances nécessaires à sa réussite afin de lever les verrous actuels. Compte tenu des enjeux à la fois en terme de génie civil, de structuration ou réimplantation d'espaces naturels, voir cultivables, dans la zone critique urbaine et péri-urbaine, ce sujet nous semble mériter de bénéficier de l'intérêt et des connaissances de différents acteurs issus de disciplines relevant de l'étude des milieux naturels de surface et de sub-surface aussi bien dans les domaines des interactions aux échelles fines entre les constituants minéraux et organiques du sol, les expertises en physique et structuration des sols ainsi que les compétences des écologues et agronomes pour l'implantation et le développement du vivant. Une réflexion pluridisciplinaire permettra d'apporter l'accélération nécessaire au génie pédologique qui présente en plus des enjeux sociétaux, un domaine d'étude privilégié des processus

à l'origine de la formation des sols et sur la compréhension de son fonctionnement. En effet, la construction de Technosols présente l'avantage de maîtriser les paramètres d'entrée du système sous réserve d'une caractérisation adéquate des matériaux d'apport utilisés et la possibilité de connaître et de faire varier leurs proportions en fonction des besoins. Les sols construits offrent donc une perspective d'étude particulièrement pertinente qui se positionne entre l'observation des systèmes naturels complexes et les systèmes modèles de laboratoire simplifiés permettant une compréhension plus fine des processus impliqués.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Les aspects transverses concernés par la contribution concernent les Territoires et s'intègre aux attentes des PEPR sous-sol et PEPR solutions pour la ville durable et innovations territoriales. La thématique s'inscrit aussi dans l'aspect responsabilité environnementale en lien avec la nécessité de revalorisation des déchets dans des conditions limitants à la fois leur impact environnemental et les flux de carbone émis vers l'atmosphère.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des perspectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- Manque de pluridisciplinarité pour aborder les mécanismes de l'échelle des interactions des constituants à celle de la parcelle
- Manque d'approches plus fondamentales pour développer des solutions viables (par exemple comment obtenir des sols reconstruits fertiles en limitant l'apport conséquent de matières organiques dès la surface ?)
- la problématique des terres excavées et plus généralement de la reconstruction de sols reste peu visible dans le domaine d'étude de la zone critique

Besoin d'interdisciplinarité,

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- structurer une communauté pluridisciplinaire à partir de celles du génie pédologique, du génie civil et de la SIC.

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

5ème défi, Territoires du futur.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	
Nom(s) et prénom(s)	Labanowski Jérôme et Leslie Mondamert
Adresse(s) mail	jerome.labanowski@univ-poitiers.fr ; leslie.mondamert@univ-poitiers.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	X
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) : One health	X

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

(re)Distribution et devenir dans les compartiments aquatiques (biofilms, sédiments, eau) des contaminants organiques historiques et émergents. En effet il y a peu d'études qui traitent en même temps des différents compartiments et permettent d'avoir une vue de la contamination spécifique de chacun.

Pollution des milieux aquatiques continentaux par les contaminants organiques : quels sont les « retours à l'homme » qu'il faut potentiellement craindre en termes de risques sanitaires (eg antibiorésistance, virulence). La pollution n'est souvent étudiée qu'à travers ses potentiels effets écotoxiques /délétères sur les microorganismes. Elle peut être pourtant un activateur du monde microbien et de ses risques pour l'homme (approche One Health)

Limites à la résistance et à la résilience des milieux aquatiques. Est-ce qu'il est possible d'établir de seuils qui pourraient devenir des outils de gestion ?

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Thème à la croisée entre « Eau Bien commun » et « conflits d'usages et d'usagers »

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

L'interfaçage avec les équipes de santé reste compliqué et l'absence de considération des environnementalistes dans les représentations /visions sociétales de la santé publique (« Les sciences de la santé n'appartiennent qu'au médecin ») et dans les programmes de recherche en santé freine la considération des déterminants environnementaux et la mise en place de politique publique.

Complexité et temporalité des liens entre « environnement » et « santé »

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Il y a un manque d'études épidémiologiques et/ou de données toxicologiques sur les effets cocktails (cocktails de substances chimiques, cocktails d'exposition chimique+physique+biologique ...)

Il manque d'informaticiens /mathématiciens dans les équipes pour pousser l'exploitation des données

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Santé et environnement : approche One Health = quelles atteintes à la santé des milieux engendrent des risques pour la santé humaine : et réciproquement quelles atteintes à la santé humaine engendrent des répercussions sur la santé des milieux (eg. COVID vs désinfectant/médicaments)

Changement climatique : Quelles conséquences des polluants et de leurs effets sur le fonctionnement et les équilibres biogéochimiques et hydrologiques des milieux aquatiques

Territoires du futur : quelles mesures ou réglementations seraient à prioriser au regard des connaissances et des constats actuels

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Mieux comprendre le transport et la transformation des biocides urbains
Nom(s) et prénom(s)	Imfeld, Gwenaël ; Payraudeau, Sylvain ; Masbou, Jérémy
Adresse(s) mail	imfeld@unistra.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	X
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	X
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Certains biocides sont inclus dans les enduits et les peintures des façades d'habitation comme inhibiteurs de la photosynthèse pour ralentir le développement algal et fongique¹. Une fois appliqués, ils peuvent être lessivés lors des pluies^{2,3}. Ce lessivage est décrit depuis peu comme une source importante et encore mal comprise de pollution des eaux souterraines urbaines due à l'infiltration des eaux pluviales favorisée à l'échelle du quartier par la doctrine de 'ville éponge'^{4,5}. Certains biocides pourraient persister dans les aménagements interceptant les lames ruisselantes contaminées (noues enherbées, pieds de façades, pavés, etc.), puis dans les sols à la faveur de l'infiltration vers les eaux souterraines. Les gestionnaires des eaux urbaines ont besoin d'approches complémentaires pour leur permettre (i) de hiérarchiser les biocides pertinents en fonction de leur comportement du sol jusqu'à la nappe (e.g. composés persistants et donc faiblement dégradés ou présentant un risque d'accumulation dans la ZNS urbaine), (ii) d'évaluer la capacité naturelle d'atténuation des biocides et de leurs produits de transformation dans la ZNS des sols et les limites de cette capacité face à la pollution chronique des sols par ces biocides et (iii) d'évaluer l'impact du changement climatique sur l'intensité de mobilisation des biocides de façades puis de leur réactivité depuis les pieds de façades jusqu'aux eaux souterraines, et (iv) de cartographier et quantifier les flux et la dynamique des risques toxicologiques et écotoxicologiques associés à l'exposition aux biocides.

La contribution et la sollicitation des différents aménagements interceptant les biocides vis-à-vis de l'infiltration vers la nappe reste à préciser à l'échelle du quartier et de la ville. De plus, comprendre le fonctionnement biogéochimique de la zone non-saturée (ZNS) des sols et de la nappe vis-à-vis de la dégradation des biocides urbains permettrait de guider les pratiques et les actions pour limiter (i) les sources de biocides en cas de proximité immédiate des eaux souterraines et (ii) les transferts depuis les surfaces collectrices du lessivage des biocides, à travers le sol vers les eaux souterraines.

1. Burkhardt, M., Zuleeg S., Vonbank R., Bester K., Carmeliet J., Boller M., Wan-gler T. (2012). "Leaching of biocides from façades under natural weather conditions". *Environmental science & technology* 46 (10), 5497–5503.
2. Bollmann, U. E., Tang C., Eriksson E., Jönsson K., Vollertsen J., Bester K. (2014). "Biocides in urban wastewater treatment plant influent at dry and wet weather: Concentrations, mass flows and possible sources". *Water research* 60, 64–74.
3. Bollmann, U. E., Fernandez-Calvinno D., Brandt K.K., Storgaard M.S., Sanderson H., Bester K. (2017). "Biocide runoff from building facades: degradation kinetics in soil". *Environmental science & technology* 51 (7), 3694–3702.
4. Hensen, B., Lange J., Jackisch N., Zieger F., Olsson O., and Kümmerer K. (2018). "Entry of biocides and their transformation products into ground-water via urban stormwater infiltration systems". *Water research* 144, 413–423.
5. Bollmann, U. E., Minelgaite G., Schluesener M., Ternes T., Vollertsen J., Bester K. (2016). "Leaching of Terbutryn and Its Photodegradation Products from Artificial Walls under Natural Weather Conditions". *Environmental Science & Technology* 50 (8).
6. Fenner, K., Canonica S., Wackett L. P., Elsner M. "Evaluating Pesticide Degradation in the Environment: Blind Spots and Emerging Opportunities". *Science* 2013, 341 (6147), 752–758.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

- Aspects sociaux, économiques, architecturaux et de politique urbaine (gouvernance, jeu des acteurs) pour 'rendre visible', évaluer les alternatives à l'utilisation de biocides dans les matériaux de construction et les freins à leur application

- Approches d'écotoxicologie microbienne sur l'effet des biocides dans les sols et les eaux urbaine
- Approche d'art urbain sur le biocide et les biocides ?

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Comment quantifier sur le terrain la transformation des biocides dans les zones d'infiltration hydrologiquement reliées aux surfaces collectant les ruissellements chargés en biocides ?

Comment mieux prédire les flux de biocides et de leurs produits de transformation vers les réseaux et les zones d'infiltration hydrologiquement reliées aux surfaces collectant les ruissellements chargés en biocides ?

Quelles sont les risques écotoxicologiques associés aux cocktails de biocides et de leurs produits de transformation dans les ruissellements provenant des bâtiments, les sols et les eaux souterraines ?

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- Développement d'approches d'évaluation à l'échelle du quartier et de la ville.
- Expériences en colonne de sol (carottes de sol intacts) au laboratoire

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

- Dans les environnements récepteurs sélectionnés, prélèvement des sols (zone racinaire et sous-racinaire si végétalisés), des eaux non-saturées et des eaux souterraines.
- Analyse des échantillons de terrain et des colonnes en termes de réactivité des biocides cibles dans les environnements récepteurs
- Modélisation

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Lien avec le défi 'Territoires du futur', soulignant les impacts liés à l'urbanisation et les risques pour la biodiversité.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Restitution de l'atelier "Echanges surface - atmosphère dans la zone critique (particules, gaz à effets de serre, composés réactifs) des 6-7 juin 2023 à Toulouse"
Nom(s) et prénom(s)	Claire Delon, Virginie Marécal, Didier Voisin, pour le CS LEFE-CHAT
Adresse(s) mail	Claire.delon@aero.obs-mip.fr , didier.voisin@univ-grenoble-alpes.fr , virginie.marecal@meteo.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	x
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	x
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Le récent colloque de prospective CNRS-INSU de la communauté Océan-Atmosphère a mis en avant la nécessité de la multidisciplinarité pour traiter les questions d'échanges de composés aux interfaces surface continentale / atmosphère. La mesure et la modélisation approfondie des émissions et des dépôts de composés est en effet une condition sine qua non de la bonne compréhension de la chimie atmosphérique. Au travers de cet atelier, nous avons souhaité réunir les personnels impliqués dans la mesure et la modélisation des émissions et des dépôts de composés gazeux et particulaires, en lien avec le sol, la végétation, les nutriments et l'eau. L'objectif était de réunir les communautés qui travaillent à l'interface continent – atmosphère pour mieux prendre en compte les processus biogéochimiques dans les estimations des échanges de gaz réactifs, de gaz à effet de serre, et de particules.

Les discussions ont porté sur les efforts à mener pour améliorer la synergie autour des thématiques de recherche associées aux interfaces, principalement aux interactions entre les surfaces continentales et l'atmosphère.

L'interdisciplinarité est une des conditions nécessaires pour relier la biologie à la chimie et la physique pour l'étude des processus dans le système Terre. Les outils existants au sein des OSU (services d'observations notamment) peuvent servir de base (géographique et thématique) de travail pour lier les recherches aux interfaces menées par des communautés OA et SIC, en mettant en place des chantiers là où des données existent déjà (coordination observation / modèles) et ensuite les imbriquer dans des échelles plus larges, par exemple le paysage. La volonté de travailler en commun aux interfaces doit être vue comme un avantage au sein des deux communautés SIC et OA. Une volonté de création d'un programme national « Flux » ou « Interfaces » (à l'image du PNTS pour la télédétection) a été mise en avant, suivant l'analyse que le rôle admis de Comités Scientifiques des Programmes Nationaux est la construction d'une communauté scientifique autant que l'expertise et le financement de projets.

La discussion a été menée autour des questions suivantes : Comment faciliter la communication entre SIC/OA/SHS ? Quelles sont les émissions les plus critiques pour la composition chimique et leviers pour les estimer ? Comment articuler l'approche biologique/biogéochimique de fine échelle et les bilans globaux/régionaux de composés ? Quels outils et méthodes pour améliorer la synergie observations/modèles aux interfaces ? Comment mieux prendre en compte l'estimation du dépôt atmosphérique dans un contexte de changement d'utilisation des sols ?

En conclusion, il reste une action forte à mener pour porter plus largement les interfaces. Partage de communauté, construction de communauté nationale.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Identification commune des besoins de la communauté atmosphère vers SIC et SIC vers Atmosphère pour une construction bilatérale des solutions.

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Besoin de communautés de recherche Atmosphère et SIC qui se côtoient plus naturellement et plus souvent, à l'image de l'interaction existante pour les communautés océan (ex. LEFE-CYBER).

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Changement climatique

Santé et environnement

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Synthèse de la prospective OA 2023 concernant le continuum continent-océan
Nom(s) et prénom(s)	Nicolas Savoye pour la CSOA
Adresse(s) mail	nicolas.savoye@u-bordeaux.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	x
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	x
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	x
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	x
13-Le continuum biotique/abiotique	x
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	x
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	x
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	x
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) : Les SIC dans leurs interfaces avec l'océan	x

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Le texte ci-dessous est la synthèse de la prospective OA 2023 concernant le continuum continent-océan. A travers cette fiche, il est mis à la connaissance de la communauté SIC (dont certains membres ont en partie contribué aux textes et/ou discussions qui ont débouché à cette synthèse) afin qu'il puisse, le cas échéant, être utile à la prospective SIC.

Continuum continent-océan

L'océan côtier (du littoral au talus) est notamment caractérisé par sa position d'interface (continent/océan/atmosphère/anthroposphère) et la faible profondeur de sa colonne d'eau le rendant particulièrement sensible à l'anthropisation. Il en résulte une circulation des eaux et des flux de matières d'une grande intensité, une large diversité d'écosystèmes et d'habitats sur un faible espace (respectivement à l'échelle de l'océan global et à l'échelle d'un écosystème) et enfin un forçage anthropique fort qui s'interconnecte avec un forçage naturel lui aussi fort, d'origines continentale, océanique comme atmosphérique. Sa complexité, sa forte dynamique (intensité des flux de matière et d'énergie), la forte variabilité spatiale (à très petite comme à large échelle) et temporelle (événements extrêmes, variabilité saisonnière, évolution pluri-décennale) de cette dynamique confèrent à l'océan côtier un caractère unique dans le fonctionnement de l'océan global.

L'étude de cet océan et du continuum littoral-océan répond à de très nombreux enjeux scientifiques et sociétaux liés à l'élévation du niveau de la mer, l'évolution du trait de côte et des risques d'érosion-submersion, le réchauffement climatique et ses conséquences, la capacité de l'océan côtier à piéger le carbone anthropique, l'acidification des eaux, la pollution et la capacité de l'océan côtier à 's'épurer', la stabilité des écosystèmes sur le long terme.

Les questions scientifiques

Plusieurs verrous scientifiques clés ont été identifiés par la communauté, et doivent faire l'objet de notre attention. Le premier porte sur le niveau de la mer et la morphologie littorale. Malgré les travaux importants déjà menés lors des années précédentes, il est nécessaire de mesurer, comprendre et prévoir les variations régionales du niveau de la mer afin de détecter les modes climatiques (de l'événementiel à l'interannuel) qui impactent les littoraux, de quantifier ces impacts sur la morphodynamique du littoral et en particulier les risques d'érosion et de submersion et de détecter les mécanismes de résilience des côtes face aux pressions climatiques et anthropiques.

L'étude du transport et du devenir de l'eau et de la matière associée (matière particulaire et dissoute), doit permettre de mieux comprendre les interactions d'échelles spatiales, la connectivité et l'impact des flux sur le fonctionnement des écosystèmes non seulement le long du continuum estuariens – systèmes côtiers – plateau continental – océan ouvert/océan profond mais également le long du littoral entre systèmes côtiers adjacents. Il sera nécessaire d'identifier, parmi les processus connus, ceux agissant à des échelles temporelles courtes (événementielle et saisonnière, incluant les événements extrêmes) mais aussi longues (décennales à centenales). Il faudra pour cela s'appuyer sur les observations *in situ* et satellitaires ainsi que sur la modélisation numérique et ainsi mettre en place les observations permettant de paramétrer ces processus dans les modèles. Il sera également nécessaire de mettre en place des mesures afin de comprendre les processus de transferts de

matière et d'éléments, dont les polluants et contaminants, entre les compartiments dissous et particulaire (incluant e.g. les floculats) et ainsi de mieux paramétrer les modèles.

Le rôle des espèces ingénieuses essentielles au couplage physique-biogéochimie-biologie en zone peu profonde doit être mieux contraint. Par définition, les espèces ingénieuses sont des espèces qui, par leur seule présence, modifient le fonctionnement de leurs écosystèmes. Ce sont souvent des espèces dont la seule structure physique crée un nouvel habitat. L'influence de ces espèces ingénieuses sur le fonctionnement physique et biogéochimique des écosystèmes peu profonds (incluant les zones intertidales) est encore peu étudiée et mal connue. Il sera donc nécessaire d'étudier le rôle des structures formées par ces espèces ingénieuses (mangroves, herbiers, forêts de macroalgues, récifs d'huîtres, structures coralliennes, bancs de maërl, champs de haploops, etc.) sur l'hydrodynamique, l'hydrodynamique sédimentaire et les flux biogéochimiques dissous et particulaires. Concernant ces derniers flux, il s'agira notamment de quantifier le rôle de ces structures dans le piégeage du carbone particulaire et dans les flux de carbone dissous et de nutriments (incorporation/production, respiration/reminéralisation ; notion de carbone bleu). Ces travaux permettront également d'alimenter l'établissement de bilans de matière à l'échelle des écosystèmes. Il sera nécessaire d'inclure ces structures dans les modèles physiques et dans les modèles couplés physique/biogéochimie/biologie.

La quantification des flux de matière et la réalisation de bilans de matière à l'échelle des écosystèmes et à l'échelle d'un cycle annuel complet sont essentielles pour établir des bilans de matière à l'échelle de la planète. Il est d'autant plus essentiel de le faire pour les écosystèmes côtiers au vu de l'importance de l'océan côtier dans les flux globaux. Ces flux et ces bilans doivent être régulièrement réévalués en lien d'une part avec les avancées technologiques et d'autre part avec le changement global. Il s'agit des flux des éléments biogènes (C, N, P, Si, O, S, micronutriments) et de polluants/contaminants (métalliques et organiques dont plastiques) (voir Défi "Anthropisation et pollutions"). En particulier, les flux du matériel dissous relargués à partir des sédiments 'anciens' (échelle pluridécennale à centennale) sont actuellement mal connus, de même que la part piégée dans les estuaires. Concernant plus spécifiquement les flux de carbone, il sera notamment nécessaire 1) de réévaluer les biovolumes et les relations carbone-biovolume des populations phytoplanctoniques naturelles et de mesurer les flux de carbone à l'échelle de la cellule et 2) de mieux contraindre la variabilité spatiale (à l'échelle des habitats ; à l'échelle des grands types d'écosystèmes côtiers) et temporelle (aux échelles événementielles et saisonnières) des flux des différents types de carbone (particulaire et dissous, organique et inorganique) en incluant spécifiquement le méthane en plus du CO₂ afin de 3) mieux identifier et quantifier les forçages naturels et anthropiques sur ces flux.

In fine, des bilans de matière devront être produits et/ou ré-estimés à l'échelle des écosystèmes côtiers et de leurs interfaces le long du continuum continent-océan mais aussi entre écosystèmes côtiers (connectivité entre écosystèmes) et plus largement à l'échelle de l'océan côtier et de ses interfaces avec le continent, l'océan ouvert/océan profond et l'atmosphère.

La communauté nationale 'océan' s'est largement mobilisée pour étudier l'évolution décennale à pluri-décennale des écosystèmes côtiers au cours des dernières années, grâce notamment aux séries chronologiques acquises par les services d'observation et les réseaux de surveillance. Cette mobilisation doit être poursuivie. Un des points clef sera, au-delà de l'identification des différents forçages aux trajectoires d'évolution des écosystèmes, de quantifier la part respective de ces forçages, qu'ils soient d'origine anthropique ou naturelle, locale ou globale, qu'ils agissent de façon directe ou indirecte, de façon diffuse ou subite (notion de changement d'état). Les modèles

d'équations statistiques (e.g. modèles d'équations structurelles) semblent actuellement trop peu robustes pour permettre cette quantification de façon fiable. Il sera nécessaire de les rendre plus robustes ou de créer les outils statistiques permettant cette quantification. Les études multi-écosystémiques, c'est-à-dire des études faites simultanément sur un panel d'écosystèmes soumis à des gradients de forçages, devraient permettre une meilleure déconvolution et une meilleure quantification de ceux-ci. Elles permettront également de comprendre si les trajectoires des écosystèmes sont similaires ou évoluent le long du gradient littoral-océan. Modéliser ces trajectoires d'évolution sera enfin nécessaire.

Ces travaux devraient représenter des jalons pour permettre de prévoir les trajectoires futures ou a minima de tester des scénarios d'évolution des trajectoires en fonction de scénarios d'évolution des forçages et ainsi anticiper au mieux la réponse de l'océan côtier et de ses écosystèmes au changement global. A terme, il devrait être possible d'estimer la capacité de résistance et de résilience des écosystèmes côtiers.

Forces et opportunités

Les études menées par la communauté 'Océan' sur l'océan côtier sont disciplinaires, pluridisciplinaires tout autant qu'interdisciplinaires. Elles peuvent associer, en plus des physiciens, des sédimentologues et des biogéochimistes, des mathématiciens, des écologues et des biologistes ou encore des chercheurs issus des sciences humaines et sociales (géographes, historiens, juristes, économistes, sociologues, anthropologues...). En effet, cet océan sous forte contrainte anthropique est aussi une zone de forts enjeux sociétaux, rendant l'étude des socio-écosystèmes souvent indispensable. Par ailleurs, le continuum littoral-océan ne peut être étudié sans prendre en compte les activités et processus présents dans les bassins versants et dans les estuaires et donc englober son étude dans celle du continuum continent-océan. Les communautés SIC et OA doivent donc travailler de concert.

L'importance de l'océan côtier dans le fonctionnement de l'océan global ainsi que sa proximité au continent et le linéaire de côtes de la France continentale et ultramarine fait que la communauté académique française étudie cet océan depuis près de deux siècles. La diversité des «implantations» et des territoires en métropole et en outre-mer est aussi une force pour étudier des systèmes océaniques dans des contextes climatiques et géographiques différents, permettant une vision très complète du système. Près d'une trentaine de laboratoires et stations marines français sont ainsi distribués sur les côtes et toutes les unités de recherche du domaine Océan possèdent une composante côtière. Les recherches futures pourront également s'appuyer sur la complémentarité des approches incluant l'observation *in situ*, l'observation satellitaire et la modélisation. Actuellement, la communauté 'Océan' étudie activement l'océan côtier grâce notamment aux infrastructures nationales — l'IR* Flotte Océanographique Française et ses navires côtiers et de station, l'IR ILICO et les Services Nationaux d'Observation qui y sont rattachés — mais aussi locales (moyens à la mer, observatoires) des laboratoires de recherche et de leurs tutelles.

Parmi les opportunités dont la communauté s'empare, le lancement de la nouvelle mission d'altimétrie satellitaire SWOT en décembre 2022 offre une continuité d'observation des eaux continentales à l'océan ouvert pour les études topographiques (voir encadré SWOT), et ce avec une communauté française très investie. De même, la mise en place relativement récente des missions satellites Sentinel permet l'acquisition d'images à très bonne résolution spatiale et spectrale, en particulier pour la couleur de l'eau. Enfin, la décennie des océans (UNESCO) et sa déconvolution

nationale via le PPR 'Océan et climat – un océan de solutions' a permis dans la première vague, le financement de quatre projets impliquant directement la communauté côtière.

Si l'accès à l'océan côtier est a priori assez aisé grâce à sa proximité du continent et aux différents moyens à la mer (navires, embarcations diverses, drones et autres vecteurs) des contraintes majeures restreignent toutefois les études du plateau continental des écosystèmes à petits fonds.

Du fait de sa moindre accessibilité depuis le continent comparativement à la bande littorale, le plateau continental fait historiquement et en quelque sorte 'naturellement' l'objet d'un moins grand nombre d'études à travers les mesures *in situ*. Les mesures satellitaires au contraire permettent une bonne étude du plateau continental. Néanmoins ils sont limités à la surface de l'océan et à un lot de paramètres relativement restreint comparativement aux mesures *in situ*, même si l'instrumentation lidar, déployée sur navires, avions ou plateformes fixes, pourrait permettre d'étudier les flux de carbone dans les premières dizaines de mètres. Il en résulte que le plateau continental est sous-étudié. Or il représente la plus grande surface de l'océan côtier. Il est donc nécessaire de réaliser un effort d'étude et d'échantillonnage de cette zone en utilisant les différents vecteurs qui le permettent. Les avancées technologiques récentes et à venir concernant les drones et les gliders permettant d'embarquer plusieurs capteurs, voire des préleveurs, seront utiles pour cela. De même l'arrivée d'un navire semi-hauturier dans la Flotte Océanographique Française, s'il reste dans son dimensionnement initial, permettra un réel bond en avant pour des études *in situ* pluridisciplinaires et interdisciplinaires. Il permettra par exemple de mieux évaluer l'importance des zones de plateaux continentaux dans la production et le stockage de carbone et les flux biogéochimiques en domaine pélagique, en domaine benthique, à leur interface et à l'interface océan-atmosphère.

La difficulté d'étude des zones de petits fonds est liée d'une part à la très forte hétérogénéité spatiale à l'échelle infra-kilométrique voire métrique associée à une forte dynamique temporelle qui nécessitent la multiplication dans l'espace et dans le temps des mesures et des prélèvements pour obtenir une représentativité correcte des zones d'étude, et d'autre part à la difficulté d'accès de certaines zones (e.g. mangroves) ou au contraire à la sur-fréquentation de certaines autres (activités économiques, touristiques et récréatives), rendant délicat voire impossible la mise en place de mesures automatisées. Par ailleurs les mesures satellitaires n'y sont pas encore toutes adaptées (proximité de la côte, résolution spatiale -excepté pour l'optique- et temporelle trop faible). De telles zones peu accessibles mais fortement représentées et présentant des enjeux scientifiques forts comme les mangroves devront également faire l'objet d'efforts d'étude et d'échantillonnage.

Recommandations

L'étude de l'océan côtier et du continuum littoral - océan doit pouvoir s'appuyer sur le tripode observation *in situ* / observation satellitaire / modélisation. Ce tripode doit pouvoir servir de base à la mise en place d'une stratégie nationale d'observation dont les prémices existent mais qui doit arriver à maturité dans les cinq ans à venir. Les trois communautés se connaissent mais leur synergie doit être renforcée. L'IR ILICO (Infrastructure de Recherche Littorale et Côtière) est le lieu d'incubation et de définition de cette stratégie nationale en lien avec les IR dont il partage les interfaces : continentale avec eLTER, hauturière via le FROOS, et atmosphérique via ACTRIS. Le pôle de données ODATIS de l'IR DATA TERRA a également un rôle à jouer concernant la mise en synergie des jeux de données issus des observations et de la modélisation. Néanmoins, mettre en place une telle synergie implique généralement de manipuler des jeux de données hétérogènes de formats différents, avec parfois des référencements différents, sur des grilles qui peuvent être complexes afin de bien représenter les traits de côte, et pouvant représenter de gros volumes de données. Il est

donc nécessaire de développer des outils numériques de plus en plus complexes et intégrateurs de traitement, interpolation, comparaison, visualisation. La mise en commun de tels outils représente un réel bénéfice en termes de gain de temps, d'échanges et d'acquisition de compétences. Les travaux menés à l'échelle nationale dans le cadre du PPR 'Océan et climat - un océan de solution' (e.g. projets MEDIATION, RIOMAR et FUTURE-OBS) en lien avec l'IR ILICO et ceux menés à l'échelle européenne (projets JERICO et travaux en vue de JERICO-RI) pourront nourrir ces réflexions tout comme le PEPR RIDGES. Celles-ci devront également porter sur des moyens à bas carbone et à faible empreinte environnementale. Une telle stratégie nationale d'observation devra posséder une vision intégrée de l'ensemble du continuum littoral-océan en prenant en compte la diversité des écosystèmes côtiers et dépasser les frontières disciplinaires des domaines Océan-Atmosphère et Surfaces et Interfaces Continentales, en tenant compte les forçages et impacts anthropiques via une ouverture aux SHS.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Cycle biogéochimique du soufre et éléments chalcophiles
Nom(s) et prénom(s)	Pierre Le Pape
Adresse(s) mail	pierre.le_pape@upmc.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	x
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	x
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	x
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	x
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	x
11-Les contaminants de la Zone Critique	x
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	x
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	x
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	x
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	x
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Cycle biogéochimique du soufre et éléments chalcophiles

Le cycle biogéochimique du soufre est connecté à celui des éléments chalcophiles (e.g. Cu, Zn, As, Sb, Se, Ge...etc.), qu'ils soient contaminants, métaux d'intérêt économiques, ou encore nutriments, ainsi qu'à celui du carbone, notamment via la fonctionnalisation de la matière organique par des groupements thiol, offrant des sites de complexation à forte affinité chimique pour ces mêmes éléments traces. Les minéraux de sulfures de fer, essentiellement produits via des processus de bioréduction du Fe(III) particulaire et des sulfates dissous, sont ubiquistes dans les environnements de surface anoxiques ou suboxiques et contrôlent donc fortement les cycles biogéochimiques de ces éléments chalcophiles dans les environnements réducteurs de la zone critique. Bien que ces minéraux sédimentaires produits par la diagenèse précoce aient été essentiellement étudiés dans les archives sédimentaires anciennes pour reconstruire les conditions biogéochimiques passées, ils ont également un bon potentiel pour servir d'indicateurs paleoredox dans les archives sédimentaires récentes, par exemple pour estimer des conditions d'eutrophisation liées à l'absence d'oxygène. De plus, leur affinité avec les contaminants, nutriments ou métaux d'intérêt économique devra être mise à profit pour mettre au point des procédés de (bio)remédiation ou de reconcentration sous des formes minérales spécifiquement choisies, par exemple pour leur stoechiométrie ou leur faible solubilité. La mise au point de ces procédés, si possible de manière éco-compatible, par exemple en utilisant des processus peu coûteux en énergie et inspirés du fonctionnement naturel des écosystèmes, passe par l'étude de la cristallogénèse des phases porteuses, des mécanismes d'association à l'échelle moléculaire des éléments cibles (incorporation, sorption, complexation), et par l'étude de la réactivité physico-chimique aux interfaces de ces phases minérales pièges. Techniquement, l'étude de ces composés soufrés fragiles et/ou métastables car très sensibles à l'oxydation requiert un contrôle strict de l'environnement rédox de l'échantillon pour travailler en conditions non perturbées du prélèvement à l'analyse depuis l'échelle bulk jusqu'à l'échelle moléculaire.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Contribution sur le développement des techniques spectroscopiques sondant l'échelle moléculaire en sciences de l'environnement
Nom(s) et prénom(s)	Pierre Le Pape
Adresse(s) mail	pierre.le_pape@upmc.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	x
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	x
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	x
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	x
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	x
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	x
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	x
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	x
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Contribution sur le développement des techniques spectroscopiques sondant l'échelle moléculaire en sciences de l'environnement

L'analyse des systèmes biogéochimiques à l'échelle moléculaire permet d'avoir une approche mécanistique pour faire le lien avec les flux et les transferts d'éléments entre les différents compartiments de la zone critique. Sur les grands instruments tels que les synchrotrons, des techniques analytiques telles que les spectroscopies XANES/EXAFS/XPS/STXM sont maintenant accessibles au plus grand nombre sur des lignes de lumières dédiées et adaptées aux utilisateurs, y compris les non spécialistes. Toutefois, des développements sont à l'œuvre et/ou sont attendus notamment pour améliorer (1) l'échelle d'analyse, (2) le seuil de détection, ou (3) garantir l'intégrité des échantillons naturels sensibles via des environnements échantillons spécifiques. Par exemple, des méthodes initialement utilisées par les physiciens en systèmes synthétiques tels que le HERFD-XANES (High Energy Resolution Fluorescence Detected-) sont maintenant applicables sur des échantillons environnementaux complexes et sensibles, permettant de mieux décrire la spéciation des éléments en systèmes dilués avec des mélanges d'espèces chimiques. D'un point de vue prospectif, d'autres types de spectroscopies telles que la spectroscopie XRS (X-Ray Raman Scattering), RIXS (Resonant Inelastic X-Ray Scattering), XES (X-Ray Emission Spectroscopy) ou encore HEROS (High Energy Resolution Off-Resonant Spectroscopy) restent à être importées plus largement depuis le champ de la physique et appliquées sur des problématiques des géosciences au sens large. Enfin, la communauté du X-FEL présente le potentiel, à terme, pour analyser des systèmes environnementaux dynamiques à l'échelle temporelle de la nano ou de la picoseconde. Typiquement, cette résolution permettra dans l'avenir une meilleure compréhension de phénomènes tels que la nucléation de phases minérales ou encore de cinétiques chimiques, par exemple de sorption d'éléments sur une phase solide. On peut imaginer qu'à terme les résultats expérimentaux amenés par ces techniques hautement résolues en temps permettront de faire le lien avec les modélisations de dynamique moléculaire dont l'utilisation est également en développement en sciences de l'environnement.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Interactions éco-biogéochimique au sein de la zone Critique : rôle particulier des écosystèmes régulateurs sur les flux de nutriments et de contaminants dans les bassins versants.
Nom(s) et prénom(s)	Sauvage Sabine, Camboulive Thierry, Dumora Bruno, Gandois Laure, Granouillac Franck, Guiesse Maritxu, Hansson Sophia, Lecerf Antoine, Le Roux Gaël, Pey Benjamin, Pautot Corinne, Probst Anne, Probst Jean-Luc, Sánchez-Pérez José-Miguel, Suc Virginie, Teisserenc Roman, Sarthou Jean-Pierre.
Adresse(s) mail	Sabine.sauvage@univ-tlse3.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	X
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	X
11-Les contaminants de la Zone Critique	X
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	X
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	X
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	X
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X

21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Nous sommes une équipe interdisciplinaire qui travaillons sur les interfaces sols/eau/plantes/atmosphère dans les systèmes faibles à fortement anthropisés sous des contextes pédo-climatiques différents et aux différentes échelles spatiales et temporelles, depuis le processus microbien jusqu'au bassin versant. Nous nous appuyons à la fois sur les observatoires de la Zone Critique, nous sommes responsables de 3 observatoires, et sur des techniques d'observations alliant l'observation du vivant impliqués dans les flux biogéochimiques et les contaminants avec des techniques géochimiques et de la modélisation numérique.

Auteurs :

Sauvage Sabine, Camboulive Thierry, Dumora Bruno, Gandois Laure, Granouillac Franck, Guiresse Maritxu, Hansson Sophia, Lecerf Antoine, Le Roux Gaël, Pey Benjamin, Pautot Corinne, Probst Anne, Probst Jean-Luc, Sánchez-Pérez José-Miguel, Suc Virginie, Teisserenc Roman, Sarthou Jean-Pierre.

Equipe Eco-Biogéochimie de la Zone critique (ECOBIZ) du Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement UMR5245, CNRS, UPS, INP-ENSAT.

Comprendre et quantifier 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 restent un enjeu à toutes les échelles spatiales et temporelles. Les zones humides occupent une petite proportion (et en diminution) de la surface continentale, mais jouent un rôle essentiel dans la biogéochimie mondiale en stockant jusqu'à 50 % de la matière organique du sol et en réduisant considérablement l'exportation de nutriments inorganiques aux réseaux fluviaux et à la mer. Le rôle unique des zones humides dans la biogéochimie locale et mondiale résulte de la tendance des zones humides à avoir des sols gorgés d'eau et anoxiques pour certains tout au long de l'année. La disponibilité limitée d'oxygène permet une variété de voies métaboliques alternatives grâce à l'énergie microbienne. Comprendre le rôle spécifique de la dynamique de ces écosystèmes sous influences anthropiques, et en condition pédo-bioclimatiques différents vis-à-vis du cycle du carbone et de l'azote, mais aussi vis-à-vis des contaminants inorganiques (éléments traces et radioéléments), pesticides et micro-plastiques est un enjeu important. Pour cela il est primordial d'étudier leurs interactions dans les continuums terrestres-aquatiques par une approche intégrée à l'échelle du bassin versant. Il s'agit à la fois de considérer le rôle spécifique des organismes vivants et de l'homme en constante évolution et l'impact des changements globaux. Réciproquement les zones humides (retenues/mares, zones ripariennes) associées aux anthropo-systèmes ou associées aux écosystèmes frontières (tourbières, pergélisol...) régulent les contaminants dans le bassin versant et jouent un rôle majeur dans les grands cycles biogéochimiques (carbone, azote...), ces derniers sous la dépendance des micro et macro-organismes en constante évolution. Dans ces écosystèmes, les enjeux résident dans la prise en compte du rôle du vivant ainsi que ses interactions dans les cycles biogéochimiques et flux de contaminants au sein des zones de régulation mais aussi à l'échelle du bassin versant.

Les recherches sur la dynamique des écosystèmes régulateurs au sein des socio-écosystèmes permettraient avec nos connaissances intégrées à l'échelle des bassins versants d'aborder par l'observation et la modélisation l'intégration des processus éco-biogéochimiques complexes à répliquer dans différents types d'écosystèmes terrestres et aquatiques dans des contextes pédo-bioclimatiques différents. Les travaux sur les relations éco-biogéochimiques pourraient s'appuyer sur une combinaison d'approches corrélatives (couplage d'inventaires faunistiques et de mesures des stocks et flux de matière et d'énergie, approches stoechiométriques ...), expérimentales (mésocosmes), et numériques (modèles énergétiques) ; ainsi que sur des approches combinant des traceurs spatiaux (isotopes stables et biomarqueurs) et temporels (radio-isotopes) pour mieux comprendre les sources, les processus de stockage et de libération/déplacement des nutriments et des contaminants à l'échelle spatiale et temporelle des processus.

Afin de lever les verrous méthodologiques et conceptuels faisant obstacles à leur comparaison il est important de répliquer les études dans différents types d'écosystèmes terrestres et aquatiques. L'ensemble des résultats

serviront à la recherche de principes généraux concernant l'importance du rôle du vivant (micro et macro-organismes) sur les cycles biogéochimiques et les mécanismes associés. Au niveau temporel, il est primordial de travailler sur les rétro-observations et les systèmes d'observations à long terme (>10ans) en s'appuyant sur les observatoires de la zone critique (OZCAR), les OHMs et les zones ateliers et coupler cela avec de la modélisation pour permettre de simuler des trajectoires d'évolution. Au niveau spatial, les travaux aborderont de l'échelle locale (sites expérimentaux adaptés à la compréhension de processus) à l'échelle globale moins mécanistique. L'exploration des données de télédétection (SMOS, GRACE, Sentinelle, SWOT ...) permettraient désormais d'accéder à une couverture spatiale inédite et à un suivi des dynamiques hydrologiques à l'échelle de la centaine de mètre dans les bassins versants. Les flux entrants et sortants de ces écosystèmes régulateurs permettraient de comprendre leur réponse fonctionnelle face à des forçages climatiques (événements climatiques courts et extrêmes) et des perturbations anthropiques chroniques ou aiguës.

Mots clefs : interactions Eco-biogéochimiques, écosystèmes régulateurs, continuum terrestre-aquatique, niveau d'organisation, conceptualisation, observatoires, modélisation, trajectoires.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Nos recherches ont pour objectif de comprendre les mécanismes impliqués dans le transfert et le devenir des grands cycles biogéochimiques et des contaminants en y intégrant le rôle particulier du vivant et de l'homme. Nous travaillons sur ces interactions abiotiques-biotiques. Et surtout nous travaillons sur des territoires très contrastés faiblement et fortement anthropisés sur tous les continents, depuis le permafrost aux pays du Sud.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Comment étudier les interactions biotiques-abiotiques ? quelles sont les échelles pertinentes ?

Comment suivre les organismes vivants sur le long terme ? quels outils ?

Quelle est la dynamique de ces interactions ? comment identifier les points de bascule ? comment les intégrer dans des modèles de prédictions pour obtenir des trajectoires ?

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

RH en suivi des observatoires, RH en modélisation des écosystèmes

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

Obtenir de la RH sur du long terme, des CDI sur projets que l'on peut garder sans contraintes

Obtenir de la RH sur la modélisation des écosystèmes

Obtenir de la RH sur le traitement de données issus des observatoires.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Santé-Environnement : santé des écosystèmes, santé humaine, car cette contribution propose d'étudier à la fois les interactions biotiques et abiotiques dans un contexte de préservation des écosystèmes et en même temps sur la préservation des ressources (eau, agriculture ...)

Changement climatique : les trajectoires des écosystèmes sont étudiées sous l'impact des changements globaux

Territoires du futur : travail en aval avec les acteurs du territoire, transférabilité des études, partenariat avec la société sur les recherches pour travailler ensemble sur les anthroposystèmes du futur.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Enthousiasme en faveur de la pérennité du programme EC2CO
Nom(s) et prénom(s)	EVRARD Olivier, FOUCHER Anthony
Adresse(s) mail	olivier.evrard@lsce.ipsl.fr , anthony.foucher@lsce.ipsl.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	X
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Le programme EC2CO apporte vraiment une plus-value essentielle pour financer des manip de laboratoire/de terrain originales ou des développements instrumentaux risqués. Il permet aussi de mettre en œuvre des manip originales en collaboration avec un ou plusieurs autres labos. Le financement de projets EC2CO permet souvent de publier des articles méthodologiques originaux et il a déjà fait ses preuves pour obtenir des financements plus importants pour la suite (ex. projets ANR). Beaucoup de sources de financement ne permettent pas de financer les missions, les frais de fonctionnement et les petits équipements, ce que permet justement le programme EC2CO et ce qui est très apprécié.

Nous souhaitons donc juste insister sur la valeur ajoutée apportée par le programme EC2CO pour le financement de la recherche nationale et espérons vivement qu'il se poursuivra à l'avenir !

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Le programme EC2CO constitue une source de financement complémentaire à d'autres, qui donnent un cadre officiel aux collaborations (ex. IRP ou IRL), mais qui ne permettent souvent pas de financer certaines missions, les frais de fonctionnement et les petits équipements. C'est particulièrement vrai pour la plupart des collaborations avec les pays du Sud (des financements de stages ou de thèses peuvent être trouvés par ailleurs, mais le financement des frais de missions, des frais de fonctionnement et des petits équipements est souvent très difficile par ailleurs...)

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Une difficulté particulière était l'impossibilité de financer des gratifications de stage, mais c'est désormais possible.

Une autre difficulté était liée à la re-soumission d'un projet avant chaque nouvelle année, mais le financement obtenu l'est désormais sous une forme pluri-annuelle, ce qui constitue un gain de temps et d'énergie appréciable.

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Poursuivre la possibilité de financer des stages et d'octroyer directement des financements pluri-annuels, le cas échéant.

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Le programme EC2CO permet de tester des approches originales permettant de relever des défis sociétaux (et le monde actuel n'en manque pas).

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	MITATE Lab Post-Fukushima studies, un exemple d'action transdisciplinaire
Nom(s) et prénom(s)	EVARD Olivier, ASANUMA-BRICE Cécile
Adresse(s) mail	olivier.evard@lsce.ipsl.fr , asanuma.brice.cecile@cnr.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2- Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constante	
3- Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4- Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	X
5- Des outils aux données et aux connaissances	
6- La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7- Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9- Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10- Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11- Les contaminants de la Zone Critique	
12- Le continuum Homme/Terre/Mer	
13- Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15- L'éco-hydrologie	
16- Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17- Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18- L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19- Les échelles de temps dans les SIC	
20- L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21- Énergie et transition énergétique dans les SIC	
22- Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Une approche transdisciplinaire visant à comprendre, suivre et limiter l'impact des perturbations anthropiques sur les écosystèmes et les sociétés a été lancée en 2020 dans la région affectée par les retombées radioactives consécutives à l'accident nucléaire de Fukushima. Le projet de recherche international (IRP) MITATE Lab/post-Fukushima studies (<https://mitatelab.cnrs.fr/>) vise à mettre en œuvre une telle approche transdisciplinaire et à l'appliquer à un cas d'étude emblématique de ce que peuvent générer des perturbations anthropiques sur les écosystèmes et les sociétés.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Un défi particulier lié à ces approches transdisciplinaires réside dans le dialogue parfois complexe entre les disciplines, avec les acteurs sur le terrain et l'importance de restituer les résultats a posteriori auprès de ces acteurs de terrain.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Une difficulté particulière est liée au financement effectif des recherches transdisciplinaires. Les organismes de recherche en général, et le CNRS en particulier, permettent de donner un cadre à de tels actions. Par contre, les projets déposés à l'ANR, par exemple, sont généralement examinés par des commissions disciplinaires, ce qui conduit bien souvent au rejet des projets déposés.

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Développer des sources de financement réellement ouvertes aux recherches transdisciplinaires.

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Ces contributions transdisciplinaires sont particulièrement pertinentes face aux défis sociétaux actuels (et qui ne font que se renforcer, en lien avec la crise climatique). Dans ce cadre, un élargissement de la thématique d'intérêt de MITATE Lab aux 'crises socio-environnementales' au-delà du cas d'étude de Fukushima est envisagé.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Intérêt d'analyser l'ADN environnemental
Nom(s) et prénom(s)	EVRARD Olivier, FOUCHER Anthony
Adresse(s) mail	olivier.evrard@lsce.ipsl.fr , anthony.foucher@lsce.ipsl.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2- Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constante	
3- Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4- Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5- Des outils aux données et aux connaissances	
6- La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7- Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	X
9- Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10- Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11- Les contaminants de la Zone Critique	
12- Le continuum Homme/Terre/Mer	
13- Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15- L'éco-hydrologie	
16- Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17- Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18- L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19- Les échelles de temps dans les SIC	
20- L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21- Energie et transition énergétique dans les SIC	
22- Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Des résultats récents de metabarcoding ADN obtenus sur différentes matrices (eaux, sols, sédiments) montrent que l'information obtenue est très différente selon la matrice. De nombreuses recherches restent donc à mener pour utiliser la matrice la plus adaptée en fonction de la question de recherche ciblée. Les techniques évoluent également très rapidement (ex. développement des séquenceurs de terrain) et il convient de rester dans la course.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Outre les applications liées à la reconstruction des changements paysagers et de leurs conséquences sur les ressources en eau et en sol, un champ de recherche très intéressant sur l'impact de ces mêmes changements paysagers sur l'évolution de la biodiversité semble s'ouvrir.

Ces approches liées à l'analyse de l'ADN environnemental suscitent beaucoup d'intérêt parmi les communautés en géosciences à travers l'Europe et le monde, et la communauté scientifique française a certainement une carte à jouer sur cette thématique, en interaction avec ses partenaires.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Discussions techniques complexes entre communautés des sciences de la Terre et biologistes

Prix élevé des analyses de metabarcoding

Application du protocole de Nagoya

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Besoin de personnes parlant à la fois le langage des géoscientifiques et des biologistes pour faire le lien entre les deux communautés

Aide administrative pour satisfaire aux conditions imposées par le Protocole de Nagoya

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

Nagoya

Lien entre les communautés

Financements spécifiques pour suivre les évolutions technologiques

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Les techniques associées à l'analyse de l'ADN environnemental fournissent des informations uniques et originales pour relever de nombreux défis sociétaux, mais il est important de communiquer sur les limites associées à l'utilisation de ces outils.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	La recherche sur les SIC à l'heure des crises sédimentaires
Nom(s) et prénom(s)	EVARD Olivier, FOUCHER Anthony
Adresse(s) mail	olivier.evard@lsce.ipsl.fr , anthony.foucher@lsce.ipsl.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2- Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constante	
3- Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4- Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5- Des outils aux données et aux connaissances	
6- La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7- Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9- Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10- Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11- Les contaminants de la Zone Critique	
12- Le continuum Homme/Terre/Mer	
13- Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15- L'éco-hydrologie	
16- Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17- Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18- L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19- Les échelles de temps dans les SIC	
20- L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21- Energie et transition énergétique dans les SIC	
22- Autre thème ? (à préciser) : La recherche sur les SIC à l'heure des crises sédimentaires	X

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

La recrudescence des événements extrêmes particulièrement marquée ces toutes dernières années nous conduit à nous interroger sur le rôle que la communauté SIC peut apporter dans le contexte actuel d'urgence climatique. La succession d'épisodes marqués de sécheresse et de crues éclair et l'occurrence de méga-feux de plus en plus fréquente ont un impact très fort sur les ressources en eau et en sol (et sur les écosystèmes) et sur les transferts d'eau, de matière, de contaminants, d'espèces entre les différents compartiments des bassins versants/de la Zone Critique.

Il y a à la fois de nombreux besoins de connaissances sur les processus sous-jacents et d'appui à l'aide à la décision pour les gestionnaires.

Nous semblons également avoir quitté une phase climatique à l'équilibre pour rentrer dans un état instable (ex. configuration inédite des zones de haute et de basse pressions qui conduisent à des sécheresses ou à des pluies intenses), ce qui nécessite d'étudier l'impact de ces changements sur les ressources en eau et en sol et sur les transferts d'eau, de matière, de contaminants, d'espèces entre les différents compartiments des bassins versants/de la Zone Critique dans un contexte particulièrement chahuté.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Les attentes de certains pays davantage affectés par ces événements extrêmes d'un type nouveau (ou d'une intensité/fréquence) nouvelle et celles de la société sont particulièrement fortes.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Quelle priorisation des questions et des besoins de recherche ?

Quelles précautions nouvelles pour les travaux de terrain dans des conditions extrêmes dans des zones qui n'en connaissent pas ou peu auparavant ?

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Priorisation des questions

Aide pour le terrain en conditions hostiles

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs, si adapté) :

Les attentes des politiques et de la société face à ces événements sont particulièrement fortes.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Les échelles de temps dans les SIC pour les reconstructions de trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques
Nom(s) et prénom(s)	EVARD Olivier, FOUCHER Anthony
Adresse(s) mail	olivier.evard@lsce.ipsl.fr , anthony.foucher@lsce.ipsl.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2- Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constante	
3- Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4- Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5- Des outils aux données et aux connaissances	
6- La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7- Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9- Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	x
10- Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11- Les contaminants de la Zone Critique	
12- Le continuum Homme/Terre/Mer	
13- Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15- L'éco-hydrologie	
16- Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17- Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18- L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19- Les échelles de temps dans les SIC	X
20- L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21- Énergie et transition énergétique dans les SIC	
22- Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

La collecte, l'analyse et la datation des profils de sols et des archives sédimentaires fluviatiles et lacustres constituent un outil de choix pour mener à bien les reconstructions des trajectoires (et les calculs de temps de réponses) des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques.

Toutefois, les outils modernes permettant ces analyses ne sont pas toujours facilement disponibles (capacités de datation limitées, indisponibilités de bancs de découpe/photographies, accès à un CT-scan,...)

Les collègues (glaciologues) qui étudient les carottes de glace s'alarment de la perte actuelle de compétences pour l'analyse des marqueurs radioactifs dans la glace et qui sont indispensables pour la datation de la partie sommitale de ces archives de glace.

Les recherches actuelles relatives à la définition de l'Anthropocène et l'identification de nouveaux marqueurs de l'Anthropocène (ex. rapport isotopique $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$) (Chaboche et al., 2022) ne sont pas facilement analysables en France.

Le lien entre les banques internationales d'enregistrement des échantillons géologiques et la cyber-carothèque nationale n'est pas toujours aisé non plus.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

La collecte, l'analyse et la datation des profils de sols et des archives sédimentaires fluviatiles et lacustres constituent un outil qui permet de faire le lien entre plusieurs communautés scientifiques et les acteurs locaux, notamment dans les pays du Sud.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Structuration de plusieurs centres d'excellence d'analyses d'archives sédimentaires où les équipements nécessaires et à la pointe de la technologie seraient disponibles (Chambéry, Bordeaux, Saclay,...)

Création d'un réel « data repository » national facilement utilisable (à l'image de Zenodo ?)

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Les archives sédimentaires, leur analyse et leur datation constituent un outil unique pour replacer les trajectoires actuelles dans un cadre de temps plus long, ce qui est important pour poser les bases d'un débat sain au regard des défis sociétaux actuels.

Chaboche, P. A., Pointurier, F., Sabatier, P., Foucher, A., Tiecher, T., Minella, J. P. G., Tassano, M., Hubert, A., Morera, S., Guedron, S., Ardois, C., Boulet, B., Cossonnet, C., Cabral, P., Cabrera, M., Chalar, G., and Evrard, O.: $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ signatures allow refining the chronology of radionuclide fallout in South America, *The Science of the total environment*, 843, 156943, 10.1016/j.scitotenv.2022.156943, 2022.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Développement de réseaux de capteurs connectés et données d'observation en territoires isolés
Nom(s) et prénom(s)	BOUGER Guillaume, SAUCEDE Thomas
Adresse(s) mail	guillaume.bouger@univ-rennes.fr , thomas.saucede@univ-rennes.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	X
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

- A l'occasion de la prospective, nous nous proposons de présenter un état des lieux des développements réalisés et à venir, mais aussi des verrous technologiques et méthodologiques à lever sur la thématique de l'observation des interfaces continentales (eau douce, terre, mer) en territoire isolé, depuis le capteur jusqu'à l'accès, la gestion et l'accessibilité des données pour nourrir les programmes scientifiques et améliorer nos connaissances d'écosystèmes vulnérables. Ces développements technologiques et scientifiques donnent lieu à des échanges privilégiés entre partenaires des deux instituts du CNRS. Nous nous appuyerons sur l'exemple du projet WiSeNet (Wireless Sensor Network) (AAP ITT, INSU OSUR/DT INSU, INEE ZATA, IPEV) reposant sur la technologie et protocole LoRaWAN (Low Range Wide Area Network) qui vise à rendre accessible à la communauté les données d'observation de programmes INSU et INEE en territoires isolés ultramarins (Terres australes françaises) sans couverture réseau, pour le bénéfice des recherches soutenues par l'institut polaire français et la zone atelier ZATA. Seront abordés des enjeux technologiques (portée des réseaux d'observation sur le terrain, développement de capteurs, interfaçage de capteurs de qualité scientifique à un réseau privé LoRaWAN, transfert, gestion et mise à disposition des données pour la communauté scientifique, ...) mais aussi les enjeux de l'interdisciplinarité inhérente à ce projet et de l'articulation avec les initiatives nationales structurantes (TERRAFORMA, RTCE). Cette contribution s'inscrit également dans la réflexion, portée par S Gogo dans une autre fiche prospective, sur la mise en place d'un observatoire de la zone critique dans les TAAF.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

- _ Besoins de formations nationales sur l'IOT/LoRaWAN
- _ Optimisation de la maintenance et du recueil des données dans les SNO.
- _ Optimisation du coût énergétique des instruments.
- _ synergies avec l'équipex+ Terra-Forma (création de réseaux de capteurs dans les SNO et le RZA)
- _ synergie avec le projet de création d'un observatoire de la zone critique dans les TAAF
- _ synergies avec le RTCE
- _ Réflexion sur l'optimisation du coût environnemental de la métrologie.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Les verrous essentiellement technologiques, méthodologiques et de moyens suivants persistent :

- l'observation en territoires isolés et non couverts en GSM (sans connexion réseau) peut bénéficier de la technologie LoRa et du protocole LoRaWAN. Mais la portée des communications reste une difficulté. Il est donc nécessaire d'élaborer des répéteurs et de tester leur robustesse et la facilité de déploiement sur des sites isolés, aux conditions météorologiques extrêmes.
- Les capteurs de haute précision du commerce (Campbell, RBR, etc.) ne sont pas compatibles nativement en LoRaWAN et les capteurs « sur étagères » LoRaWAN ne sont ni suffisamment robustes ou précis pour les remplacer. Il faut donc construire des interfaces permettant de lever ce verrou.
- Les instruments déployés sur ces sites isolés ont besoin d'être au maximum étanches et très basse consommation énergétique : la maintenance sur site pouvant parfois être inférieure à une visite annuelle.
- Le transfert, la gestion et l'accessibilité aux données d'observation nécessite la pérennité de compétences, de ressource RH, de réseaux de métiers et de bonnes collaborations nécessaires entre organismes (IPEV, OSU, IPHC) et instituts (INEE, INSU, IN2P3), dans le cadre des initiatives nationales développées (TERRAFORMA, RTCE). Elle pose aussi la question de la pérennité de financements certes modestes, mais récurrents.

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- _ *RH : Electronicien pour la conception de cartes et capteurs compatibles (LoRaWAN)*
- _ *RH : informaticien pour la programmation des cartes et des nœuds réseaux (en lien avec l'IPEV, l'IN2P3 de Strasbourg, l'OSUR de Rennes et l'équipex+ Terra Forma)*
- _ *Logistique terrain en territoires isolés (en lien avec l'IPEV)*
- _ *Maintenance des capteurs existants (matériel pour étanchéifier les coffrets etc.), achat de composants, de capteurs scientifiques et/ou sur étagères pour tests in-situ.*

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

- _ *continuer la prospection sur l'interface et/ou l'élaboration de capteurs de qualité scientifique sur le réseau LoRaWAN.*
- _ *finir et tester in situ les prototypes de répéteurs réseaux Lora (2024/25)*
- _ *valider le fonctionnement à long terme du réseau de capteurs*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Notre proposition s'inscrit dans le grand défi sociétal (1) du CNRS sur le changement climatique : face à l'urgence du changement climatique, chercheurs et chercheuses ont besoin de données d'observation abiotique et biotique afin de nourrir les modèles régionaux de prévision du climat (vagues de chaleur, ressource en eau, rivières atmosphériques) et de réponse des espèces et des écosystèmes (espèces invasives, dispersion, ...).

Les réseaux de capteurs IOT doivent permettre de fournir des données accessibles à tous (selon les principes du FAIR). Et ce, même pour les sites instrumentés isolés. Il est donc nécessaire de mener une réflexion sur le coût environnemental de tels déploiements de réseaux sur le terrain :

_ baisse de la fréquence de visite sur site pour maintenance / récupération des données ?

_ facilitation de la récupération des appareils en fin de vie pour recyclage ?

_ coût en termes de stockage énergétique (piles lithium) et de fabrication de composants (cartes électroniques)

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Proposition de compléments
Nom(s) et prénom(s)	Vigier Nathalie
Adresse(s) mail	nathalie.vigier@imev-mer.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	x
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	x
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	x
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	x
22-Autre thème ? (à préciser) :	x

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

L'ensemble des thèmes proposés me paraît plutôt représentatif. Voici quelques suggestions pour certains d'entre eux :

5- Thème "Des outils aux données et aux connaissances"

cela pourrait inclure la transmission des connaissances vers les acteurs de la société et les décideurs

9- Thème "Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques"

. ce thème pourrait concerner la réponse des organismes, des espèces en plus de celle des écosystèmes.

. il pourrait y avoir un focus particulier sur l'impact des événements extrêmes, et de la transition énergétique

11- Thème "Les contaminants de la Zone Critique"

. ce titre paraît un peu classique, je proposerais plutôt une emphase sur les nouveaux contaminants / les polluants émergents, y compris ceux en lien avec la transition énergétique, à moins qu'on en discute en thème 21

. notions d'exposome et de cocktail de contaminants en contexte de changement global à considérer car pas mal de lacunes en la matière me semble-t-il

16- Thème "Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère" et 17- Thème "Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne"

Dans la veine des thèmes 16 et 17, IL serait peut-être utile de réfléchir à l'interface avec l'océan. les approches SIC sont différentes et en même temps complémentaires de celles des océanographes étudiant le côtier. Entre AO et SIC, nous avons aussi des liens via l'écologie des espèces côtières, les contaminants, les algues toxiques etc

21- Thème "Energie et transition énergétique dans les SIC" :

Très bonne idée. Dans ce thème on pourrait inclure la problématique environnementale liée à l'exploitation, l'utilisation et le (non) recyclage matériaux des énergies non renouvelables

22 – un autre thème éventuel : la reconstitution et la modélisation de l'évolution des SIC au cours de l'histoire de la Terre : les nouveaux proxies, les outils, la résolution spatiale et temporelle, leur importance dans l'évolution des espèces, dans les grands cycles biogéochimiques et l'évolution du climat de la terre

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Intégration des processus évolutifs courts – Role des virus-
Nom(s) et prénom(s)	
Adresse(s) mail	

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	X
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	X
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les micro-organismes sont généralement perçus comme intervenant à des échelles de temps courtes en raison de leurs capacités de réponse et d'adaptation rapides à l'échelle de l'heure et des temps évolutifs (temps longs). Les communautés microbiennes assurent ainsi des réponses rapides (restructuration, régulation de l'expression des (méta)génomés) mais sont exposées à des phénomènes plus longs (adaptations évolutives). L'imbrication de ces processus relativement courts ou longs nécessitent une plus grande attention.

Les pressions anthropiques et celles induites par le changement climatique peuvent induire une modification des écosystèmes qui peut être ponctuelle (modification temporaire) ou durable (changement environnemental). Dans le cas d'un changement trop important, une bascule plus ou moins brutale de l'état de l'écosystème peut survenir. Dans certains cas, le retour vers l'état antérieur à la bascule est possible mais dans d'autres cas, la bascule est irréversible. Une biodiversité fonctionnelle élevée pourrait contribuer à accroître la capacité de l'écosystème à absorber ces changements sans subir de bascule. Cependant, il est important de noter que cette biodiversité est sujette à l'évolution au fil du temps. Les capacités d'adaptation et d'évolution des espèces peuvent influencer les interactions au sein de l'écosystème, créant ainsi une interconnexion entre les processus écologiques et évolutifs. Il est essentiel de considérer ces aspects, en particulier lorsqu'une espèce joue un rôle crucial dans l'écosystème.

Y a-t-il des keystone species dont le suivi évolutif est envisagé afin de comprendre son rôle possible dans le changement d'état d'un écosystème?

Y a-t-il à l'échelle cellulaire des processus évolutifs à l'origine de la perte ou de l'acquisition d'une fonction sur des temps plus courts? quel en est l'impact dans un écosystème complexe où la redondance fonctionnelle est forte ?

Les processus évolutifs des espèces bactériennes dits « courts » (à court terme, échelle du mois) au regard des temps de génération peuvent être la conséquence de modifications du génome (mutations, transfert horizontal de gènes, épigénétique..) mais également de changement/adaptation de métabolismes engendrant des modifications de flux. Ces types de modifications sont appréhendés via des approches génomiques et post-génomiques (séquençage acides nucléiques haut débit, long-reads, approche transcriptomique/métabolomiques/fluxomique). L'intégration de ces approches ne peut se faire qu'en développant des collaborations entre biologistes, chimistes et physiciens. Il est impératif de promouvoir ces collaborations multidisciplinaires et faciliter les liens entre les différents Instituts du CNRS. Le coût des appareillages (MS, RMN, Séquenceur, moyens informatiques...) nécessite d'importants moyens humains et financiers qui doivent être mis en place dans des plateformes facilement accessibles à la communauté scientifique.

Processus évolutifs à l'échelle du laboratoire sur des organismes modèles (évolution expérimentale) → modélisation à l'échelle de l'écosystème.

Il ne faut négliger le rôle des virus qui jouent à la fois un rôle de vecteurs de l'information génétique dans l'écosystème, mais également un rôle de facteur de contrôle dans la dynamique des communautés. Ils participent donc aux dynamiques aux temps courts (réponses) et longs (évolution). L'élucidation des hôtes de virus via l'exploration de données de séquençage massif doit se faire en parallèle d'un développement méthodologique permettant l'isolement de couples virus-hôte.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Besoins RH : biologie moléculaire, bioinfo et biostat

moyens financiers pour fonctionnement et financement de plateformes.

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

changement climatique au temps courts.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience
Nom(s) et prénom(s)	
Adresse(s) mail	

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2- Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3- Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4- Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5- Des outils aux données et aux connaissances	
6- La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7- Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	X
9- Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10- Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11- Les contaminants de la Zone Critique	
12- Le continuum Homme/Terre/Mer	
13- Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15- L'éco-hydrologie	
16- Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17- Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18- L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19- Les échelles de temps dans les SIC	
20- L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21- Energie et transition énergétique dans les SIC	
22- Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les pressions anthropiques et celles induites par le changement climatique peuvent entraîner une modification des écosystèmes qui peut être ponctuelle (modification temporaire) ou durable (changement environnemental). Dans le cas d'un changement trop important, une bascule plus ou moins brutale de l'état de l'écosystème peut survenir. Dans certains cas, le retour vers l'état antérieur à la bascule est possible mais dans d'autres cas, la bascule est irréversible. Une biodiversité fonctionnelle élevée pourrait contribuer à accroître la capacité de l'écosystème à absorber ces changements sans subir de bascule. Cependant, il est important de noter que cette biodiversité est sujette à l'évolution au fil du temps. Les capacités d'adaptation et d'évolution des espèces peuvent influencer les interactions au sein de l'écosystème, créant ainsi une interconnexion entre les processus écologiques et évolutifs. Il est essentiel de considérer ces aspects, en particulier lorsqu'une espèce joue un rôle crucial dans l'écosystème.

Au cours de la précédente décennie, le concept de biosphère rare a pris de l'importance pour la compréhension de la dynamique d'assemblage des espèces, notamment microbienne. Perçu comme un réservoir d'espèces et de fonctionnalités mobilisables suite à un changement de l'environnement, il contribue particulièrement aux dynamiques écologiques dans les systèmes d'interface et de transition, soumis à des environnements très hétérogènes dans le temps et l'espace de variabilités naturelles et d'origine anthropique. Un des enjeux actuels des recherches en écologie microbienne, utile à la compréhension de la dynamique des assemblages comme à la fonctionnalité des communautés ou au fonctionnement biogéochimique des écosystèmes, consiste à croiser les échelles d'étude pour comprendre les mécanismes mis en place et s'appuyant sur la redondance fonctionnelle pour in fine assurer la stabilité ou la résilience écosystémique. Pour cela, il convient de favoriser les recherches couplant (i) l'étude des organismes présents, de leur potentiel fonctionnel, de leurs cooccurrence et de leurs relations de dominances (approches (méta)génomiques) à (ii) celle de leur activité et de l'expression sélective de leur potentiel fonctionnel (approches (méta)transcriptomiques et (méta)protéomiques) et (iii) à l'étude des phénotypes dominants et du fonctionnement biogéochimique dans les écosystèmes d'interface ((méta)métabolomique, (méta)fluxomique).

Outre la redondance fonctionnelle, telle que généralement admise redondance d'organismes capables de réaliser la même fonction, il existe une redondance de voies métaboliques permettant de réaliser la même fonction mais régulées par des conditions environnementales différentes et réalisées par des organismes (par exemple méthanogénèse hydrogénotrophe ou acétoclastique, processus clé dans les émissions de méthane, gaz à effet de serre). IL est important de comprendre la contribution de cette redondance métabolique au regard des variations ou de la stabilité des processus en terme de flux.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Capacités de traitement biostatistique des big data d'origine différente (multi-OMICS)

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux
(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Les contaminants de la Zone Critique
Nom(s) et prénom(s)	
Adresse(s) mail	

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2- Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3- Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4- Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5- Des outils aux données et aux connaissances	
6- La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7- Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9- Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10- Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11- Les contaminants de la Zone Critique	X
12- Le continuum Homme/Terre/Mer	
13- Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15- L'éco-hydrologie	
16- Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17- Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18- L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	X
19- Les échelles de temps dans les SIC	
20- L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21- Energie et transition énergétique dans les SIC	
22- Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Ce point converge vers l'atelier n°9, pression anthropique et le n° 18 ecotoxicologie.

L'évaluation de la dynamique des contaminants métalliques et organiques qu'il soient historiques ou émergents dans les zones côtières, en lien avec les conditions hydrodynamiques, reste une thématique primordiale. De même, les notions de transferts trophiques de contaminants organiques et inorganiques gardent leur place centrale dans les thématiques de recherche.

En ce qui concerne les contaminants inorganiques (métaux, métalloïdes et REE), les notions de détermination de teneurs, d'identification des formes chimiques et donc de la biodisponibilité, en particulier aux interfaces eau/sédiments, eau/atmosphère et eau/biota, demeurent des questions centrales. Une attention particulière sera portée aux interfaces eau/sédiment (diffusion, remise en suspension) et eau/biofilm (absorption, adsorption) car les processus ne sont pas encore clairement connus.

L'importance des micro-organismes dans les transferts de contaminants entre compartiments de la zone critique et dans les réseaux trophiques où ils s'accumulent, ainsi que des la spéciation des contaminants est à présent reconnue. La compréhension de la régulation de ces différentes contributions microbiennes reste à approfondir. Devant la multiplicité des pressions anthropiques exercées simultanément, établir la hiérarchie des contraintes naturelles et anthropiques sur les communautés microbiennes et leurs fonctions est un enjeu majeur, qui vient s'ajouter à l'élucidation des interactions entre espèces microbiennes et contaminants chimiques spécifiques. Sur la base des descriptions taxonomiques, fonctionnelles et écologiques qui font l'objet de l'essentiel des recherches actuelles, il convient de renforcer les connaissances sur des éléments de compréhension relatifs à ces impacts anthropiques en recherchant des marqueurs de sensibilité et bio-indicateurs de l'état de l'écosystème au sein des communautés microbiennes pélagiques, benthiques ou associées à d'autres organismes. Devant la multiplicité des pressions anthropiques pouvant s'exercer simultanément, par exemple en zone portuaire, le développement des approches multi-OMICS paraît primordial pour établir une hiérarchie des pressions naturelles et anthropiques s'exerçant sur un écosystème donné à partir du potentiel génétique, de la dynamique et du fonctionnement de la communauté microbienne qu'il abrite. Les mécanismes d'adaptation et de dissémination de la résistance et de la transformation de certains contaminants chimiques spécifiques (e.g. métaux, métalloïdes, hydrocarbures, phytosanitaires et antibiotiques) pourront être étudiés via un couplage d'études à l'échelle des communautés et sur modèles cultivés.

Par ailleurs, les connaissances acquises sur les communautés microbiennes (écophysiologie, interactions inter et intra communauté, etc.) au sein des écosystèmes a conduit à l'élaboration d'un grand nombre de bio-procédés et de biotechnologies utilisés par exemple pour le traitement des pollutions urbaines, la bio-remédiation des sols, ou le traitement des rejets miniers (séquestrations de

métaux). L'approfondissement de ces connaissances permettront donc d'élargir la gamme des bioprocédés existants, d'affiner le pilotage des process, et de faire émerger de nouvelles biotechnologies dédiés à réduire l'impact des activités anthropiques sur le milieu naturel.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)

Distinction effets des contaminants vs. processus naturels de transfert ou contrôlant le biota (qui contrôle le devenir des contaminants...)

Traitement des big data appliquées au transfert de contaminants.

Renforcement de la pluridisciplinarité.

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne
Nom(s) et prénom(s)	Patricia Bonin
Adresse(s) mail	

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	X
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	X
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

A l'interface entre continents, océans et écosystèmes de subsurface, les estuaires souterrains représentent un environnement difficile d'accès et largement inexploré. Suspecté de contribuer très significativement aux bilans biogéochimiques des milieux marins et plus fréquents que les écoulements de surface, notre compréhension de leur contribution aux flux d'éléments nutritifs et de contaminants chimiques se limite à quelques échantillonnage discrets comparant la composition chimique des aquifères souterrains à celle de l'eau de mer pour en déduire des flux potentiels. Cependant, la présence de forts gradients environnementaux dans les estuaires souterrains (oxygène, salinité, disponibilité en ressources nutritives) et la variabilité des entrées d'eau (écoulement gravitationnel de l'eau douce, intrusion marines variables selon les marées et pressions atmosphériques) suggèrent l'intervention d'activités biogéochimiques variées et complexes pouvant mener à une sur- ou une sous-estimation des flux de nutriments et contaminants chimiques réalisée par comparaison des end-members. Un effort d'étude pluridisciplinaire de ces systèmes est nécessaire pour préciser le fonctionnement hydrobiogéochimique et les transferts vers la mer par les décharges d'eaux souterraines. La collaboration d'hydrologues, de géologues, de géochimistes de l'environnement, de biogéochimistes et d'écologues microbiens est nécessaire pour une vision compréhensive de ces systèmes de transition.

L'extraction minière en milieu profond va entraîner des perturbations importantes des écosystèmes profonds au niveaux abiotique (paramètres physico-chimiques environnementaux, compositions minérales et organiques dans les sites d'extraction, pH, redox...), micro-biotique (perturbation des communautés microbiennes profondes) et macro-biotique (perturbations à plus large échelle spatiale). Les effets de ces perturbations doivent être appréhendés par des études multidisciplinaires combinant géochimie (panaches minéraux/organiques créés par les activités d'extraction), physique (leurs expansions) et biologiques (perturbation des écosystèmes à petite et grande échelle spatiale).

Le dihydrogène (H_2), considéré aujourd'hui comme une molécule clé de la transition énergétique et des systèmes énergétiques futurs, est industriellement produit par des procédés de vaporeformage à partir de combustibles fossiles. Ces procédés coûteux sur le plan énergétique et générant des quantités substantielles de CO_2 , ont poussés les chercheurs à rechercher de nouveaux procédés alternatifs de production « propre » d' H_2 (électrolyse de l'eau, fermentations obscures et/ou claires, etc.). Par ailleurs, les découvertes récentes de flux naturels importants d'hydrogène émanant de structures géologiques particulière suscite un intérêt croissant de la communauté scientifique pour des recherches portant sur l' H_2 naturel (aussi appelé H_2 natif ou blanc). Ces recherches concernent les questionnements de l'évaluation des flux naturels (encore largement méconnus) et de la compréhension des mécanismes physico-chimique de sa production au seins de roches de la croûte terrestre (processus de serpentinisation au sein de sites hydrothermaux sous-marin (Nouvelle-Calédonie), de sources hyper-alcalines en contexte ophiolitique (Californie, Italie, Oman, Nouvelle-Calédonie), ou en contexte intra-cratonique (e.g., Brésil, Mali, Kansas)). Dans ces systèmes, les connaissances portant sur les microorganismes consommant ou produisant de l'hydrogène demeurent encore très pauvres. Afin d'établir des macro-bilans prenant en compte les mécanismes abiotiques et biotiques producteurs et consommateurs d' H_2 , des recherches spécifiques et multidisciplinaires associant géologues, géochimistes et microbiologistes doivent être impérativement entreprises sur des sites naturels producteur de d'hydrogène.

Dans le cadre de la transition énergétique, le stockage massique de l'hydrogène et du dioxyde de carbone (CO_2) dans des réservoirs géologiques présente plusieurs problématiques majeures. La sélection et la caractérisation appropriées des sites de stockage sont cruciales pour garantir la

sécurité et l'efficacité du processus. Afin d'éviter les fuites potentielles et stabiliser qualitativement les gaz stockés, l'intégrité à long terme des réservoirs et les processus chimiques et biochimiques in situ devront être impérativement contrôlés. De nombreux micro-organismes étant capables de consommer l'hydrogène et/ou le CO₂, et donc de modifier sur des temps courts la composition des gaz stockés, il conviendra donc d'approfondir les connaissances spécifiques portant sur ces microorganismes susceptibles de coloniser les structures géologiques (couches salées) dans des conditions de pressions hydrostatiques élevées.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Développement d'outils/mesures hautes pressions

Accessibilité au sous-sol avant transfert en mer

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Moyens RH, financiers pour acquisition et développement méthodologique outils hautes pressions

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Transition énergétique

Changement climatique

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Minéralogie urbaine
Nom(s) et prénom(s)	Pierre Le Pape
Adresse(s) mail	pierre.le_pape@upmc.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	x
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	x
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	x
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	x
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	x
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	x
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	x
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Minéralogie urbaine

De multiples recherches récentes ciblent les systèmes urbains car ces systèmes déjà très étendus aujourd'hui, en terme de surface au sol comme en terme de population, sont appelés à encore se développer dans le futur selon les projections des Nations Unies. Il est notamment question de développer les espaces urbains tout en préservant les écosystèmes et les propriétés d'habitabilité...

Les zones urbaines se caractérisent par l'omniprésence du bâti (routes, immeubles...etc.). Ces infrastructures sont constituées en majorité de mélanges synthétiques de matériaux fabriqués par l'homme (par exemple ciments, asphalte, granulats), qui subissent, au même titre que les roches et minéraux géogènes, des processus d'érosion et d'altération. Ces processus impliquent des flux importants de poussières et sédiments de composition minéralogique caractéristique, qui s'additionnent aux flux de matières provenant des environnements sédimentaires naturels. La minéralogie urbaine cible l'étude de ces particules anthropogéniques et cherche à comprendre leur nature et leur réactivité biogéochimique en fonction des contextes de transports (aérien, hydrologique) et de dépôt, ainsi que leur potentiel de contamination et de perturbation des écosystèmes. De plus, à l'instar d'indicateurs géochimiques ou biologiques déjà déployés, l'étude minéralogique fine de ces particules générées par les activités urbaines peut servir de traceur de sources pour mieux qualifier et quantifier les flux de sédiments qui alimenteront les futurs dépôts de l'anthropocène.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Le continuum biotique/abiotique
Nom(s) et prénom(s)	
Adresse(s) mail	

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	X
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Dans un contexte du continuum Abiotique/ biotique outre le volet impact des variations des paramètres environnementaux (Temp, pH, nutriments ...) sur la biodiversité spécifique et fonctionnelle des communautés et leurs rétroactions sur les paramètres de l'environnement, une meilleure prise en compte des processus abiotiques (e.g. dismutation, auto-oxydation, photochimie, géothermie...) est nécessaire.

Par exemple, Observation des processus couplés biotiques abiotiques dans les sources hydrothermales et plancher océaniques soumis à des influences hydrothermales ; influence réciproque des activités biologiques et des variations des conditions physico-chimiques environnementales sur les cycles des éléments (métaux, H, C, N)

Un point important et très peu abordé concerne le couplage entre processus abiotiques et biotiques. Un aspect peu étudié réside notamment dans la prise en compte des interactions et synergies entre processus de dégradation biotique (minéralisation de la MO par voie biologique) et abiotique (photo-oxydation et auto-oxydation, procédés naturels du type Fischer-Tropsch dans les écosystèmes hydrothermaux, etc.) qui, bien que jouant un rôle clef lors de la synthèse de novo de matière organique, ont été encore peu abordés dans la littérature.

Le transfert d'oxygène singulet lié aux processus photochimiques des phytodétritus vers les bactéries hétérotrophes associées induisant une situation de stress pouvant contribuer à une meilleure préservation de la matière organique algale illustre cette réflexion.

L'intérêt grandissant pour le changement climatique global de notre planète implique une bonne connaissance du cycle du carbone et une interprétation fiable des enregistrements paléoclimatiques. Par exemple, l'intervention de différents processus de dégradation (autooxydation, biodégradation aérobie, stéréomutation) *in situ* capables de dégrader sélectivement les alcènes di- et tri-insaturés et donc d'induire des biais lors des estimations de paléotempératures basées sur ces composés

Les découvertes récentes de microorganismes, dits électroactifs, capables d'échanger des électrons avec des supports minéraux et/ou biologiques (transfert interspécifique d'électrons) ont conduit les chercheurs à reconsidérer un certain nombre de questionnements de nature fondamentale. Par exemple l'existence de ces microorganismes électro actifs montre des capacités du vivant (i) à générer une énergie biologique utilisable à partir de phénomène d'oxydation chimique des minéraux, (ii) à modifier chimiquement des minéraux par réduction électrochimique. La découverte de ces microorganismes électroactifs fournit également une vision nouvelle sur la nature des formes d'énergie potentiellement primitive qui auraient contribué, à partir d'un environnement minéral, à l'émergence des premières formes de vie sur terre. Sur la base de ces nouvelles découvertes et de leurs retombées potentielles très importantes, les programmes de recherches sur cette thématique devront être fortement encouragés et soutenus.

Le dihydrogène (H_2), considéré aujourd'hui comme une molécule clé de la transition énergétique et des systèmes énergétiques futurs, est industriellement produit par des procédés de vaporeformage à partir de combustibles fossiles. Ces procédés coûteux sur le plan énergétique et générant des quantités substantielles de CO_2 , ont poussés les chercheurs à rechercher de nouveaux procédés alternatifs de production « propre » d' H_2 (électrolyse de l'eau, fermentations obscures et/ou claires, etc.). Par ailleurs, les découvertes récentes de flux naturels importants d'hydrogène émanant de structures géologiques particulières suscite un intérêt croissant de la communauté scientifique pour des recherches portant sur l' H_2 naturel (aussi appelé H_2 natif ou blanc). Ces recherches concernent les questionnements de l'évaluation des flux naturels (encore largement méconnus) et de la compréhension des mécanismes physico-chimique de sa production au sein de roches de la croûte

terrestre (processus de serpentinisation au sein de sites hydrothermaux sous-marin (Nouvelle-Calédonie) [6-7], de sources hyper-alcalines en contexte ophiolitique (Californie, Italie, Oman, Nouvelle-Calédonie), ou en contexte intra-cratonique (e.g., Brésil, Mali, Kansas)). Dans ces systèmes, les connaissances portant sur les microorganismes consommant ou produisant de l'hydrogène demeurent encore très pauvres. Afin d'établir des macro-bilans prenant en compte les mécanismes abiotiques et biotiques producteurs et consommateurs d'H₂, des recherches spécifiques et multidisciplinaires associant géologues, géochimistes et microbiologistes doivent être impérativement entreprises sur des sites naturels producteur de d'hydrogène.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Forte collaboration entre chimistes organiciens, géochimistes de l'environnement et ecologues microbiens

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Défi Changement Climatique/PEPR Bridges

Transition énergétique

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Réponse des écosystèmes arctiques au changement climatique : impacts sur les cycles de l'eau, du carbone et des nutriments
Nom(s) et prénom(s)	Marie Alexis Maialen Barret Camille Bouchez Christine Delire Julien Fouché Laure Gandois Laurent Orgogozo Antoine Séjourné Liudmila Shirokova
Adresse(s) mail	marie.alexis@sorbonne-universite.fr maialen.barret@ensat.fr camille.bouchez@univ-rennes1.fr christine.delire@meteo.fr julien.fouche@supagro.fr laurent.orgogozo@get.omp.eu antoine.sejourne@universite-paris-saclay.fr liudmila.shirokova@get.omp.eu

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	x
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	x
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	x
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes	

du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	x
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	x
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	x
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les écosystèmes de hautes latitudes se réchauffent quatre fois plus vite que la moyenne mondiale et les sols affectés par le pergélisol stockent ~1500 Gt de carbone (C) organique. La hausse des températures, le changement du régime des précipitations, les feux qui s'intensifient et certaines activités anthropiques entraînent la dégradation du pergélisol. La dégradation du pergélisol signifie la diminution de son étendue, l'augmentation de la profondeur de la couche active (la couche de sol qui dégèle chaque été) mais également des processus érosifs et thermokarstiques. Le devenir du carbone et des nutriments stockés dans le pergélisol, et rendu potentiellement disponibles à l'activité microbienne à la suite de ces processus de dégradation, est un enjeu scientifique majeur, puisqu'il constitue une boucle de rétroaction positive au changement climatique (Schuur et al., 2022). L'amplitude de ce processus est pourtant extrêmement mal contrainte. Le rapport du GIEC de 2021 (Canadell et al., 2021) indique que si il est établi que la zone des hautes latitudes va entrer dans une rétroaction positive d'ici la fin du siècle, l'amplitude de cette réponse n'est pas contrainte, et est aujourd'hui évaluée entre 14 et 175 GtCO₂ par 1°C de réchauffement.

Les réponses des écosystèmes de hautes latitudes au réchauffement climatique et à la dégradation du pergélisol sont diverses car liées à la diversité des écosystèmes, conditions pédologiques (par exemple la teneur en carbone), la nature de pergélisol (par exemple la teneur en glace), et l'évolutions des conditions hydriques des sols.

Afin d'aborder cette diversité, il est crucial de développer et renforcer une stratégie d'étude intégrée des écosystèmes de hautes latitudes après le dégel du pergélisol, couplant les cycles de l'eau, du carbone et des nutriments à la dynamique de la végétation et des communautés microbiennes, dans des conditions contrastées.

La communauté française qui a historiquement mené des travaux en Russie va dans les prochaines années, étendre et développer les projets existants en collaboration avec les collègues scandinaves et canadiens. Notamment, un projet collaboratif (PEACE Permafrost Ecosystem changes across the Arctic: Carbon and nutrients cycling in terrestrial-aquatic Environments) est soutenu par le programme FairCarboN pour l'étude des cycles C-N-P à l'interface des écosystèmes terrestres et aquatiques.

Références :

- Canadell, J.G., P.M.S. Monteiro, M.H. Costa, L. Cotrim da Cunha, P.M. Cox, A.V. Eliseev, S. Henson, M. Ishii, S. Jaccard, C. Koven, A. Lohila, P.K. Patra, S. Piao, J. Rogelj, S. Syampungani, S. Zaehle, and K. Zickfeld, 2021: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 673–816, doi: 10.1017/9781009157896.007.: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis.*, 2021.
- Schuur, E. A. G., Abbott, B. W., Commane, R., Ernakovich, J., Euskirchen, E., Hugelius, G., Grosse, G., Jones, M., Koven, C., Leshyk, V., Lawrence, D., Lorant, M. M., Mauritz, M., Olefeldt, D., Natali, S., Rodenhizer, H., Salmon, V., Schädel, C., Strauss, J., Treat, C., and Turetsky, M.: Permafrost and Climate Change: Carbon Cycle Feedbacks From the Warming Arctic, *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 47, 343–371, <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-011847>, 2022.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- Observations limitées à un nombre très réduit de sites aujourd'hui
- Diversité des réponses écosystémiques aux forçages climatiques aux hautes latitudes
- Écosystèmes et processus non inclus dans les modèles globaux à l'heure actuelle

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- Soutien logistique moyen à long terme pour les sites d'étude arctiques pour l'acquisition de nouvelles données et mise en place de démarches

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

- Observation, y compris rétro-observation grâce à des archives
- Instrumentation in situ
- Expérimentation
- Modélisation multi-échelle

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Changement climatique

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Questionnement des interactions recherche-société : perceptions dans la communauté de modélisation des surfaces continentales
Nom(s) et prénom(s)	Basile Hector, Sylvain Kuppel, Gérémy Panthou
Adresse(s) mail	sylvain.kuppel@ird.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) : Intégrer les enjeux environnementaux aux recherches sur les SIC	x

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Note : *Ce texte est directement issu d'un rapport de synthèse initialement destiné aux participant.e.s de la conférence mentionnée ci-dessous, lors de laquelle un atelier participatif a été conduit pour évaluer les problématiques et hypothèses discutées en préambule. Sa forme actuelle n'est pas pleinement adaptée à une prospective, n'ayant pu être remaniée faute de temps pour cette première phase d'appel à contributions, et nous nous en excusons. Elle constitue néanmoins une illustration des pratiques et perceptions de recherche directement collectée auprès d'une partie des chercheuses et chercheurs SIC, dans la communauté de modélisation des surfaces continentales (MSC). En cela, elle fait écho à la contribution « Intégrer les enjeux environnementaux aux recherches sur les SIC » également soumise dans cet appel à prospective SIC. Le texte ci-dessous pourrait donc fournir une base de travail, pour les étapes suivantes de l'élaboration de la prospective SIC, à intégrer dans une partie (que nous espérons importante) consacrée à la trajectoire de nos pratiques de recherche dans le contexte actuel ; par exemple un « encadré » focalisé sur la communauté MSC comme exemple.*

Résoudre les grands défis socio-environnementaux de notre temps demande des mutations profondes de nos sociétés dites 'développées'. Si l'on s'en réfère à l'état de l'art figurant dans le 6^e rapport du GT3 du GIEC, les changements à réaliser à court terme pour limiter le réchauffement mondial en dessous de +2°C sont tellement majeurs qu'ils sont probablement sans précédent au niveau institutionnel (voir p. ex. la Fig. TS.32 du [résumé technique](#)). Dès lors, aucun secteur, aucune activité issue des Nord et de pays tendant vers ces trajectoires économiques ne devrait s'exempter (ou être exempté) dès à présent d'un travail de réflexion évaluant son adéquation avec des trajectoires soutenables.

Cette assertion inclut évidemment la recherche scientifique, en particulier la communauté SIC et notamment la sous-communauté de modélisation des surfaces continentales (MSC), si proche des communautés d'où émanent les constats ci-dessus et d'où partent de plus en plus d'appels à l'action. En tant que scientifiques de la MSC, nous devrions donc questionner l'intrication de notre communauté au sein des sociétés, en particulier les impacts de nos pratiques de recherche mais aussi ceux de nos recherches elles-mêmes sur les sociétés. Ce dernier aspect est également une des suggestions d'un [avis récent](#) du comité d'éthique du CNRS, qui concerne l'ensemble des champs de recherche. De manière plus générale, cela fait suite à l'intrication constatée depuis des décennies en sociologie des sciences entre savoirs et pratiques scientifiques d'une part, et comportements humains individuels et collectifs (incluant la politique) d'autre part, ces rapports étant particulièrement scrutés dans le champ des *Sciences studies* (Puig de la Bellacasa, 2003). Devons-nous¹ également opérer des mutations profondes ? Cela ouvre évidemment un débat très large, mais il n'est pas inutile de tenter certains diagnostics dès à présent.

Comme d'autres communautés des géosciences, celle de la MSC a tendance à se définir en lien direct et indiscutable avec des enjeux globaux, de manière plus ou moins explicitement formulée en amont de notre recherche quotidienne (demandes de financement, ...) mais aussi en aval (publications, rapports, ...). Est-ce que cela reflète le principe selon lequel une meilleure description des problèmes est un préalable nécessaire à leur résolution ? Il est vrai que l'exemple du trou de la couche d'ozone est réconfortant à cet égard.

¹ sauf mention contraire, le « nous » est utilisé pour désigner notre communauté de MSC, par souci de concision plus que par velléité d'homogénéiser notre inévitable (et saine) diversité de pratiques et de perceptions.

Prenant le contre-pied, il est ici avancé que *s'auto-situer au cœur des enjeux* est en fait une posture qui tend généralement à masquer et éviter la remise en question de notre rôle réel dans les sociétés via des logiques d'habitudes, de normes, de vocabulaire, et de « cultures » associées à notre milieu professionnel pourtant perméable aux positionnements personnels et citoyens. Pour explorer cette tension dépassant la simple curiosité intellectuelle, les auteurs de ce texte ont donc modestement souhaité introduire de la réflexivité à l'échelle de notre communauté lors des Journées de MSC sous forme d'un espace d'expression écrite participatif organisé autour d'un ensemble de questions et de propositions. Les questionnements ici explorés pourraient se résumer comme suit : « Nos recherches vont-elles dans le sens (et/ou font-elles sens tel) que nous (le) souhaitons ? ». Dit de manière plus provocante, faisons-nous la recherche que nous prétendons faire (à nous-mêmes et aux observateurs extérieurs) ? Nombreuses et nombreux sont celles et ceux qui se sont prêté-e-s à ce jeu lors des dernières Journées de Modélisation des Surfaces Continentales (Grenoble, 7-8 octobre 2022), et les auteurs leur en sont très reconnaissants ! Les résultats ont été largement surprenants ; les auteurs proposent d'abord ici de les rappeler dans leur ensemble, puis d'en proposer une lecture (inévitavelmente située et orientée par leurs rapports à la communauté) recourant au besoin à des éléments externes à ce sondage afin de tenter d'en proposer une analyse. Merci de noter qu'il ne s'agit pas là de résultats robustes, les énoncés et méthodes d'échantillonnage feraient probablement hurler nos collègues des sciences humaines et sociales. Évidemment, toute autre lecture serait la bienvenue !

1. Résultats synthétisés

L'ensemble des sondages des supports originaux (voir photos en Annexe) est ici « numérisé » et synthétisé pour faciliter la lecture. Le nombre de présents aux JMSC étant de 94, il s'agit d'une borne haute pour les participants aux sondages. Pour chaque sondage, est d'abord décrite la distribution des réponses dans les axes proposés avec deux critères principaux : étalement et position de la distribution. Ce faisant, on prend ici le parti de chercher la majorité, ce qui invisibilise les cas particuliers ; cela présente des limites évidentes, en particulier si la diversité dans notre communauté avait été le sujet principal de cette réflexion.

1.1. Tableau des doléances

	A) A quoi sert la modélisation des surfaces continentales (MSC) ?	B) Qu'est ce qui me frustre dans les trajectoires de la MSC ?	C) Qu'est ce qui me motive dans les trajectoires de la MSC ?
1	Exposer ce qui fait nos conditions de vie (enveloppe)... qui sont ce qu'on en fait	La difficulté de l'intégration multi-échelles / multi-processus, entre des paramètres peu contrôlés et des variabilités non décrites	Donner à voir les interactions à l'œuvre dans le réel (et qui ne négocient pas, car la physique ne négocie pas)
2	Étudier des scénarios passés et futurs plausibles	La difficulté d'extrapolation d'un résultat local à plus large échelle	La possibilité de pouvoir prédire les tendances futures de changement des surfaces continentales à partir de leur état connu
3	Cela pourrait être le lieu de « rencontres » des modèles « grande » échelle (e.g. ORCHIDEE, ISBA) de la communauté « climat » avec les modèles « petite échelle » (des observatoires, sites, BVs)	Le décalage entre scientifiques et société civile +1 (<i>assentiment d'un.e autre participant.e</i>)	Apprendre à nous connecter à nous-même et aux autres
4	Arrivera-t-on à se nourrir cet hiver ?	Parfois un manque de collaboration pour des outils communs (+1)	Faire du lien entre des communautés d'horizons et problématiques variés
5	Comprendre la dynamique des échanges surface-atmosphère et notre environnement en général	Tendance réductionniste	La nourriture, de mieux en mieux !
6	A gagner notre vie (justifier notre	Tendance à accroître la complexité	Étudier les bifurcations

	position sociale)	pour résoudre l'irrésolu => fuite en avant ? A-t-on les données, métriques, pour objectiver le supplément de complexité -> Logique de croissance ?	
7	Boires des bières (bio locales et équitables) et revoir les ami.e.s	Rien, c'est un espace de rencontres, sans pression	La possibilité de faire émerger quelque chose
8	A faire rencontrer toutes les disciplines impliquées pour pouvoir être sensibilisé à divers thématiques, contextes et problématiques	Les échanges réduits entre communauté grande échelle (LSMs) et communauté des hydrologues de bassins versants	Acquérir une certaine « vision » synthétique
9	A platform to learn and share scientific outputs and opportunities	La distance énorme entre expériences de modélisation et la réalité de la gestion de l'eau à l'échelle des bassins versants	La diversité des approches, la curiosité
10	Rencontres et sociabilisations indispensables pour 1) la science, 2) notre bien être	Ça manque de géochimie, traçage, écologie, SHS.	

Tableau 1. Synthèse des doléances pour la Modélisation des Surfaces Continentales (MSC).

1.2. D'accord / pas d'accord (10 propositions)

Les participant·e·s étaient invité·e·s à positionner un curseur sur une échelle linéaire allant de « pas d'accord avec la proposition » à « d'accord avec la proposition »

	Proposition	Résultat
1	Nos modèles de surfaces continentales permettent de répondre à, et gérer, des crises majeures sur l'eau à venir	Étalé entre « pas d'accord » et neutre, quelques « plutôt d'accord »
2	La structure de nos modèles véhicule une certaine vision de la société ou du vivant	Étalé autour du « neutre » et « d'accord »
3	Nos travaux (modèles) doivent pouvoir être compris du grand public	Étalé, plus grande densité dans la partie « d'accord »
4	Le rythme, les conditions et les thèmes de nos appels à projet permettent d'avoir le recul nécessaire pour articuler nos intérêts scientifiques et la soutenabilité de nos sociétés	Groupement massif autour de « pas d'accord »
5	L'éthique en science impose l'emploi de codes libres	Forte dominance de « d'accord »
6	Notre avis sur la situation environnementale est plus éclairé que celui du reste de la population	Étalement dans la partie supérieure (« d'accord »)
7	Il y a des connaissances qu'il vaut mieux ne pas produire	Très polarisé entre 2 pôles « d'accord » et « pas d'accord »
8	Une science rigoureuse doit être neutre	Assez étalé, deux groupements « pas d'accord » et « d'accord »
9	Une science rigoureuse peut être neutre	Étalé, plutôt sur la partie « d'accord »
10	L'engagement militant des scientifiques rend la science moins rigoureuse	Étalé sur la partie « pas d'accord »

Tableau 2 : D'accord / pas d'accord : positionnements individuels vis à vis de propositions.

1.3. Événements (6 propositions)

Pour un événement donné, les participant·e·s étaient invités à donner leur avis en trois étapes : 1) sur un graphique à deux axes probabilité (d'occurrence) – impact (sur la communauté), 2) avec un curseur sur une échelle linéaire allant de « pas souhaitable » à « souhaitable », et 3) avec un autre curseur sur une échelle allant de « communauté pas préparée » à « communauté préparée ».

	Évènement	Résultat
1	La majorité des rivières françaises devient intermittente	Probabilité variable mais fort impact sur la communauté ; fort groupement « peu souhaitable » ; communauté plutôt peu/pas préparée

2	La quasi-totalité des glaciers européens disparaît	Forte probabilité mais impact sur la communauté variable ; fort groupement « peu souhaitable » ; communauté entre assez peu et assez bien préparée
3	Limitation massive des ressources disponibles pour le calcul informatique (p. ex., pénurie de terres rares, transition écologique drastique)	Impact allant de modéré à fort et probabilité étalée autour de « moyenne » ; plutôt souhaitable même si étalé (quelques « pas souhaitable du tout ») ; communauté généralement très peu préparée
4	Nos outils de modélisation sont utilisés par des courtiers pour spéculer sur le prix des services écosystémiques (eau, qualité de l'air, biodiversité...)	Impact assez faible à fort et probabilité moyenne à forte ; très peu souhaitable (quelque « assez souhaitable ») ; communauté très peu préparée (quelques « assez préparée »)
5	Les gouvernements, dont la France, s'engagent dans une décroissance volontaire	Très peu probable et impact modéré à fort ; « plutôt » à « très » souhaitable ; communauté généralement peu ou pas préparée
6	Un état puissant et impérialiste décide de financer nos recherches à des fins militaires	Probabilité très variable et impact modéré à fort ; fort accord autour de « pas souhaitable » ; étalement autour d'une communauté peu/pas préparée (quelques « assez préparée »)

Tableau 3. Positionnements individuels sur le lien entre la communauté MSC et des « événements ».

2. Discussion

Dans nos introductions, nos réponses à appels à projets, et dans les documents institutionnels de cadrage scientifique, généralement rédigés collectivement, nous insistons sur une science impliquée dans les grands enjeux socio-environnementaux : nous allons apporter des solutions, combler les lacunes de connaissances qui permettront de vivre mieux, de façon plus *souhaitable* (souhaitable et soutenable), tendant vers un réel équilibre avec le vivant et la planète.

2.1. Résultats commentés

Lorsque l'on interroge l'échantillon de notre communauté MSC ici sollicité, c'est cependant un autre paysage qui se dessine. On constate un aveu de déconnexion – perçu négativement – avec la société (Tableau 1.B.3 et 1.B.9), avec par exemple un manque de confiance dans le fait que nos modèles seront utiles pour répondre aux crises de demain (p. ex. : crise de l'eau, Tableau 2.1). Ces points interrogent l'adéquation entre les affichages classiques que l'on trouve dans nos communautés et notre perception des impacts de nos travaux sur la société.

Par ailleurs, la posture du/de la chercheur·se des MSC semble souffrir d'un illogisme entre un affichage choisi de nos communautés au cœur des enjeux et des positionnements individuels qui sont dispersés (voire polarisés) sur la question de la neutralité (possible et réelle, Tableau 2.8-9). S'il s'agit réellement de neutralité dans le cas où elle est souhaitée ou perçue comme possible, ce positionnement pourrait produire l'oxymore suivant : « un·e chercheur·se neutre qui se place *sciemment* au cœur des grands enjeux que l'on évoque fréquemment ». Remplacer « neutre » par « objectif·ve » ou « impartial·e » permettrait probablement d'atténuer cette dissonance, et peut-être de réduire la dispersion des résultats rapportée ci-dessus.

Marketing : pratiquer et s'entraîner au marketing — activité qui consiste à mentir ouvertement voire à comploter lorsque l'on s'organise collectivement pour la mettre en œuvre — ne nuit-t-il pas à nos activités scientifiques en nous « désentraînant » à être honnête, rigoureux, juste, et exigeant ; et finalement en nous « désapprenant » à suivre une démarche scientifique ? Le désentraînement est bien connu dans le domaine sportif, les athlètes de haut niveau perdant assez rapidement leurs facultés. Ils peuvent évidemment les récupérer relativement rapidement dépendamment de la durée de l'arrêt. Ne sommes-nous pas en train de nous voir comme des athlètes alors que nous sommes plutôt dans notre canapé avec un Big Mac ? Étant donné que l'affichage est en grande partie dépendant des logiques d'excellence dominant les institutions scientifiques, nous craignons qu'entre exigence et excellence il ne nous faille choisir. Nous craignons aussi que le marketing soit une des forces qui soutienne la non-soutenabilité et permette à nos dirigeants de demander d'éteindre la wifi quelques mois après avoir avalisé le déploiement du réseau 5G ou de dire « qui aurait pire prédire la crise climatique ». Ne nous insurgeons pas, nous faisons pareil. Ou alors insurgeons nous mais arrêtons de faire du marketing.

Pour tenter de « rationaliser » ces décalages concernant notre utilité sociétale, la place de la neutralité, et d'autres dissonances affectant notre pratique, on arguera peut-être que les questions d'affichage, puisque répondant à des logiques de marketing, sont à dissocier de la démarche scientifique. Mais cet argument résiste difficilement à une inspection de ce qu'implique le déploiement massif de telles techniques dans nos milieux (voir encart « marketing »). Même en admettant cet argument, on peut tout de même oser l'hypothèse suivante : notre communauté située en réalité les nœuds des enjeux socio-planétaires *en dehors* du périmètre de la science, ou du moins de celui des géosciences.

Cette hypothèse se trouve renforcée en considérant la place que les chercheur-se-s des MSC s'attribuent au sein d'évènements extérieurs :

- La limitation des ressources pour le calcul numérique (Tableau 3.3) ? Désirable, mais nous sommes loin d'être prêts à nous y adapter. Cela suggère-t-il que, tout autant que nous la trouvons désirable, nous ne mettrons jamais rien en œuvre pour la provoquer ?
- Le détournement de nos modèles à des fins de spéculation financière (Tableau 3.4) ? Nous percevons cette possibilité comme probable et avec un impact important, nous la jugeons absolument pas souhaitable et nous n'y nous sentons pas préparés. Pourquoi alors ne mettons-nous pas ce sujet sur la table de nos discussions de politique scientifique, au lieu de le cantonner aux divers collectifs scientifiques auto-constitués ? Parce que nous devons rester neutres ? Peut-être, enfin pas tant en empreinte carbone, énergétique, ou matérielle en tout cas (même si cela commence à être pris en compte par les tutelles et certains laboratoires), ni en terme d'allocation de ressources (actuellement mesuré essentiellement en €).
- Le scénario selon lequel un état puissant et impérialiste nous impose des recherches ciblées à perspectives militaires, aussi caricatural qu'il soit, est logiquement perçu comme à fort impact, pas souhaitable et que nous n'y sommes pas préparé-e-s (Tableau 3.6), mais aussi d'une assez forte probabilité ! C'est donc bien que nous interrogeons assez peu notre place au sein de l'institution, ou alors que nous ne voyons pas d'autres issues à l'impérialisme (le monde est régi par un Dialogue mélien perpétuel : [voir ici](#)). L'un comme l'autre paraissent assez peu réjouissants.

Un autre exemple, emblématique de nos disciplines techno-dépendantes : la décroissance. Nous nous accordons pour dire qu'elle est nécessaire et que ça va nous impacter violemment...sans pour autant que nous y soyons prêt-e-s (Tableau 3.5), à rapprocher du nombre très limité de nos initiatives (en tant que communauté) dans des dynamiques décroissantes ? Soit dit en passant, le risque à agir comme cela, c'est que plutôt que d'agir pour choisir une décroissance *souhaitable*, nous risquons une récession ni souhaitable ni soutenable qui arrivera le jour où les

Réductionnisme et croissance : La tendance séculaire aux approches réductionnistes dans nos disciplines mérite inspection. Participe-t-elle à renforcer une vision du monde ? Si les avis sur la question sont dispersés (du moins lorsqu'elle est posée sous l'angle de la structure de nos modèles, Tableau 2.2), une proposition déstabilisante a été esquissée (Tableau 1.B.6): en développant nos approches réductionnistes nous séparons les éléments d'une complexité qui se redécouvre à chaque nouvelle échelle. Mécaniquement, l'énergie nécessaire pour explorer nos milieux croît. Il se peut qu'elle suive une loi exponentielle ou plus probablement une loi puissance (si cette descente d'échelle suit la [théorie fractale](#), auquel cas il serait sacrément intéressant d'étudier sa [dimension fractale](#)). Pour le dire en des mots moins mathématiques, à chaque échelle, il nous faut déployer les mêmes efforts (moyens techniques, nombre d'observateurs,...) pour maintenir notre... excellence ! La sur-spécialisation que l'on s'impose ne provient-elle pas en partie du caractère fractal des approches réductionnistes ? Et n'est-elle pas elle-même dépendante de logiques de croissance ?

La dimension fractale de l'Ensemble de Cantor ci-dessous est de 0.63.



ressources (énergétiques, matérielles, phosphatées, etc.) viendront à manquer. Une sorte de voiture balai à la Mad Max.

Enfin, nous pensons être bien au fait de la situation environnementale, et de ce qu'elle implique, bien plus que le reste de la société (Tableau 2.6). Ce, en admettant pourtant que le rythme, les conditions et les thèmes de nos appels à projets *ne permettent pas* d'avoir le recul nécessaire pour articuler nos intérêts scientifiques et la soutenabilité de nos sociétés (Tableau 2.4) ; nous continuons donc cahin-caha à développer nos approches réductionnistes pour essayer de comprendre un système qui nous apparaît chaque fois plus complexe, impliquant donc une sur-spécialisation et une logique de croissance au sein-même de nos métiers (Tableau 1.B.6). Voilà une dissonance de taille (voir encart « réductionnisme et croissance ») !

Commenter ces résultats semble mettre en lumière des dissonances ayant trait à nos aspirations et nos pratiques, dont on peut raisonnablement douter qu'elles disparaissent d'elles-mêmes. Ceci appelle donc à réfléchir sur le rôle que nous avons dans la société, sur celui que nous voudrions/devrions avoir, et finalement sur ce concert ?

2.2 Quelles implications éthiques ?

Que certaines recherches soient futiles n'est pas opposé à l'éthique, si ce qui les pilote est la « beauté du geste » et qu'elles ont peu d'impacts directs et indirects. C'est une question esthétique. Est « jugé utile » ici ce qui est beau ou pas. Point de vue éminemment subjectif, dont une quelconque quantification est réductrice. On peut donc, sans rougir, assumer vouloir faire de la recherche esthétique, que cela soit sur l'objet étudié ou sur les concepts mobilisés.

C'est une autre affaire que de vouloir que ses recherches soient utiles, utilisables et utilisées (UUU – le triple U bientôt notés par nos [pauvres standards](#)). C'est évidemment louable, du moment que les fins ne sont pas nuisibles et/ou nocives. À ce titre il apparaît (à court terme) plus sain de financer

un-e mathématicien-ne perché-e qu'un-e biologiste qui travaille sur les [gains de fonction des virus](#). Le premier cas sera probablement considéré comme futile (non-essentiel comme on disait pendant la pandémie) et totalement inaccessible à la quasi-totalité de la population. Le second peut être totalement utile à quelques-uns ET être nuisible à la quasi-totalité de la population (voir encart « Boules noires, boules blanches »).

Dans le domaine de l'étude de surfaces continentales, on avance ici qu'il est difficile d'être totalement futile et que des débouchés souhaitables sont à espérer. Nos recherches devraient être UUU, et ce pour des fins que les protagonistes jugent

Boules noires, boules blanches : Un article récent (Bostrom, 2019) suggère que le progrès techno-scientifique porte en soi la capacité de déstabiliser des civilisations, et propose l'analogie d'une urne remplie de boules blanches, mais avec quelques boules noires, qui lorsque tirées, font passer un point de bascule dans les sociétés en rendant possible une destruction massive. Pour limiter ce risque, un tel développement doit donc nécessairement être accompagné d'une surveillance massive et d'un renversement de la gouvernance mondiale. Si l'on veut continuer à être joueur, on peut néanmoins réduire ce risque en abandonnant les domaines où l'on pourrait supposer que les boules noires sont plus nombreuses. Une telle proposition résonne étrangement avec le [récent avis](#) du COMETS.

Un exemple récent chez les virologues : en pleine pandémie, des équipes étudient les gains de fonction des virus en créant des 'virus chimériques' : en combinant la protéine *spike* de la variante Omicron du COVID-19 avec le virus original qui est sorti de Wuhan au début de 2020, des chercheurs de l'Université de Boston ont réussi à créer un virus au taux létal de 80% chez les souris (Chen et al., 2022). Souhaite-t-on vraiment créer un virus ayant la force de propagation du COVID et le pouvoir létal d'Ébola ? Est-ce que cela ne mériterait pas un Referendum d'Initiative Citoyenne (RIC) ou une convention citoyenne ?

Dans nos communautés, la réponse à la question « y-a-t-il des recherches qu'il ne vaut mieux pas entreprendre ? » semble très polarisée (Tableau 2.7). Peut-être pourrions-nous essayer de jeter un coup d'œil dans l'urne ... Juste au cas où ?

souhaitables, soutenables, en utilisant des moyens non nuisibles (toujours selon l'éthique des protagonistes). Historiquement, on peut supposer que ce fut parfois le cas : service de prévision des crues, liens avec industriels comme EDF... À cette époque, les articles n'avaient pas d'introductions forcément grandiloquentes (p. ex. Obled & Roche, 1975). Ou alors, s'il y avait une mise en contexte, elle était directement en lien avec l'objet d'étude, par exemple un retour d'expérience suite à des crues (Pardé, 1928). On peut raisonnablement supposer qu'à cette époque, d'une part les problématiques auxquelles répondaient la recherche étaient probablement plus tangibles pour les protagonistes, et d'autre part que le niveau et la récurrence autrement plus élevés des moyens alloués à la recherche publique rendaient moins répandue la compétition où se développent les logiques invasives de marketing discutées plus haut.

Les questions d'actualité ont changé (frontières planétaires, Anthropocène, pandémie voire syndémie), et notre place aussi. Il semble pourtant que les introductions et les réponses à projet n'ont jamais autant fait mention de la nécessité absolue de mener nos recherches pour « trouver des solutions », bien qu'à titre individuel, nous considérions que cette proposition a du plomb dans l'aile (Tableau 2.1). C'est donc une croyance collective à laquelle on a affaire. Cela indique que cet espoir de servir — d'être utile — a demeuré dans la communauté, il a infusé de façon consciente dans la culture de la communauté. Faute de quoi, cet espoir est invisibilisé soit par suivisme/mimétisme (inconscient), soit par malhonnêteté intellectuelle. La culture de notre communauté résulte probablement d'un savant mélange de ces trois mécanismes.

En quoi est-ce une croyance ? L'argument venant tout de suite à l'esprit est que nos communautés fournissent des indicateurs pertinents pour la décision ; s'ils ne sont pas bien utilisés ce n'est pas de notre faute. Le GIEC fournit un thermomètre, les décideur-se-s choisissent en fonction : « circulez y a rien à voir ». Cette approche ne permet pas de changements sociétaux significatifs (Stoddard et al., 2021), car ce n'est pas le compteur de notre bolide qui est la cause des excès de vitesse, pas plus que le débitmètre n'est responsable de notre consommation d'eau. Pour l'alcootest, ce n'est pas le cas non plus (excepté dans les sketches de Coluche). Ceci dit, on pourrait, en prenant quelques exemples bien choisis, montrer que la mesure influence positivement les comportements. *Évidemment. Évidemment.* On voit bien ici que ces différents instruments de mesure (pouvant aller jusqu'au pilotage de systèmes techniques ou vivants complexes) ne sont pas *en soi* des problèmes, ils peuvent même être des « solutions ». Mais rien ne garantit qu'ils puissent être utilisés pour d'autres fins plus discutables. En outre, comme l'ont remarqué les penseurs des techniques (I. Illich, J. Ellul, et B. Charbonneau entre autres), la technique est ambivalente : tout progrès technique apporte son lot de bienfaits et de méfaits, et ils sont inséparables, souvent imprévisibles et irréversibles. Une illustration quasi-parfaite de cette dernière phrase se trouve dans l'histoire du développement de machines agricoles pour la culture de tomates en Californie par l'Université de Californie, et du procès qui lui a été intenté pour utilisation d'argent public dans "des projets ne bénéficiant qu'à une poignée d'intérêts privés au détriment des travailleurs agricoles, des petits exploitants, des consommateurs et de la Californie rurale en général" (Winner L., 1986).

Ne pourrait-t-on pas inverser les choses ? Redevenir utiles ? Nos sciences et nos recherches (nos modèles, résultats, rapports) c'est la même chose que le compteur du bolide. Elles ne sont *en soi* ni inutiles inutilisables et inutilisées (III, le triple I) ni triple U. Le résultat entre UUU vertueux ou III néfaste dépend de l'interaction entre nos sciences et la société. Alors, on pourrait dire que cette courroie de transmission est rompue, mais où est la panne ? Naomi Oreskes suggère de critiquer (et probablement rompre avec) un « modèle de science focalisé sur l'offre » (Oreskes, 2022) en aval de nos travaux ; il est probable que les réponses soient multiples, et situées en aval comme en amont.

Références

Atelier SENS (<https://sens-gra.gitlabpages.inria.fr/atelier-impacts-recherche/>)

Bostrom, N. (2019), The Vulnerable World Hypothesis. *Glob Policy*, 10: 455-476. <https://doi.org/10.1111/1758-5899.12718>

Chen, D.-Y., et al.: Role of spike in the pathogenic and antigenic behavior of SARS-CoV-2 BA.1 Omicron, <https://doi.org/10.1101/2022.10.13.512134>, 10 January 2023.

Obled, C., & Rosse, B. (1975). Modèles mathématiques de la fusion nivale en un point. *Cahiers de l'ORSTOM, série hydrologiques* [[lien pdf](#)].

Oreskes, N. (2022). The trouble with the supply-side model of science. *Proceedings of the Indian National Science Academy. Part A, Physical Sciences* 88 (2022): 824 – 828, <https://doi.org/10.1007/s43538-022-00121-1>.

Pardé, M. (1928). Périodicité des grandes inondations et crues exceptionnelles. *Revue de géographie alpine*, 16(2), 499-519 [[lien pdf](#)].

Puig de la Bellacasa, M. (2003). Scientificité et politique aujourd'hui : un regard féministe. *Nouvelles Questions Féministes*, 22, 48-60. <https://doi.org/10.3917/nqf.221.0048>

Stoddard, I., Anderson, K., Capstick, S., Carton, W., Depledge, J., Facer, K., ... & Williams, M. (2021). Three decades of climate mitigation: why haven't we bent the global emissions curve?. *Annual Review of Environment and Resources*, 46, 6, <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-011104>

Winner L., Les artefacts sont-ils politiques? Extraits de *La baleine et le réacteur*, (1986). Consulté sur le site de l'atelier-sens de l'INRIA (<https://sens-gra.gitlabpages.inria.fr/atelier-impacts-recherche/ressources.html>)

Annexes : Photos des résultats des sondages

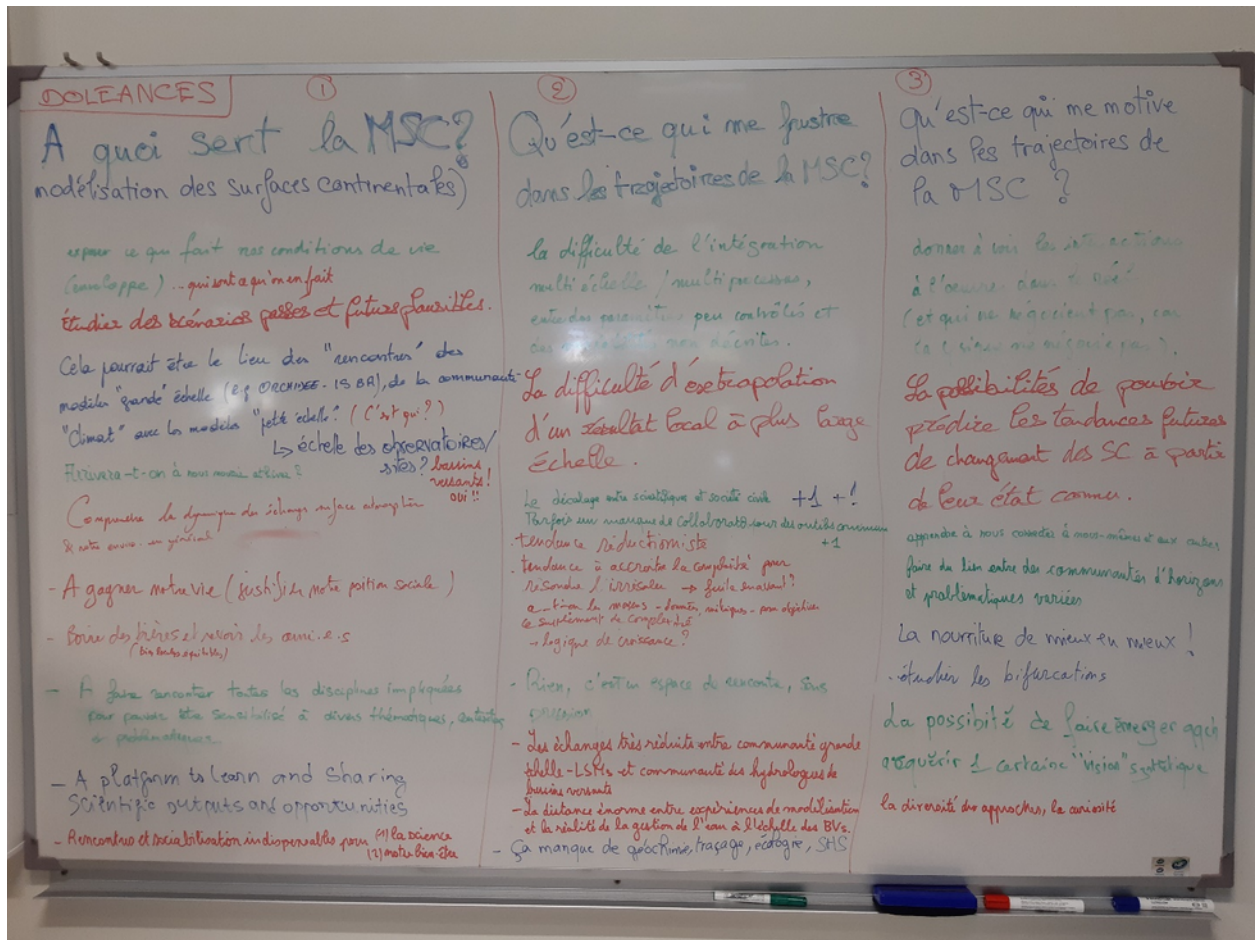


Figure A1. Synthèse des doléances pour la Modélisation des Surfaces Continentales (MSC)

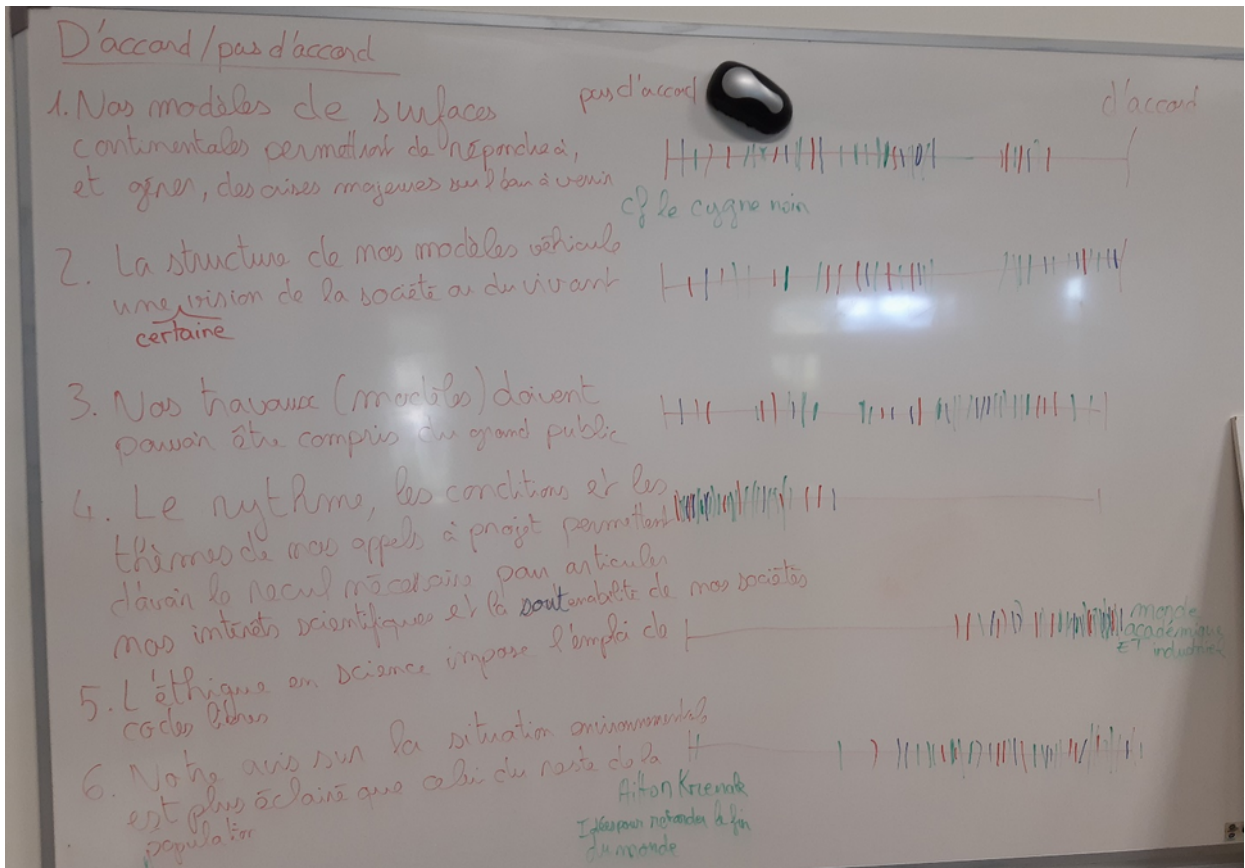


Figure A2. D'accord / pas d'accord : positionnements individuels vis à vis de propositions

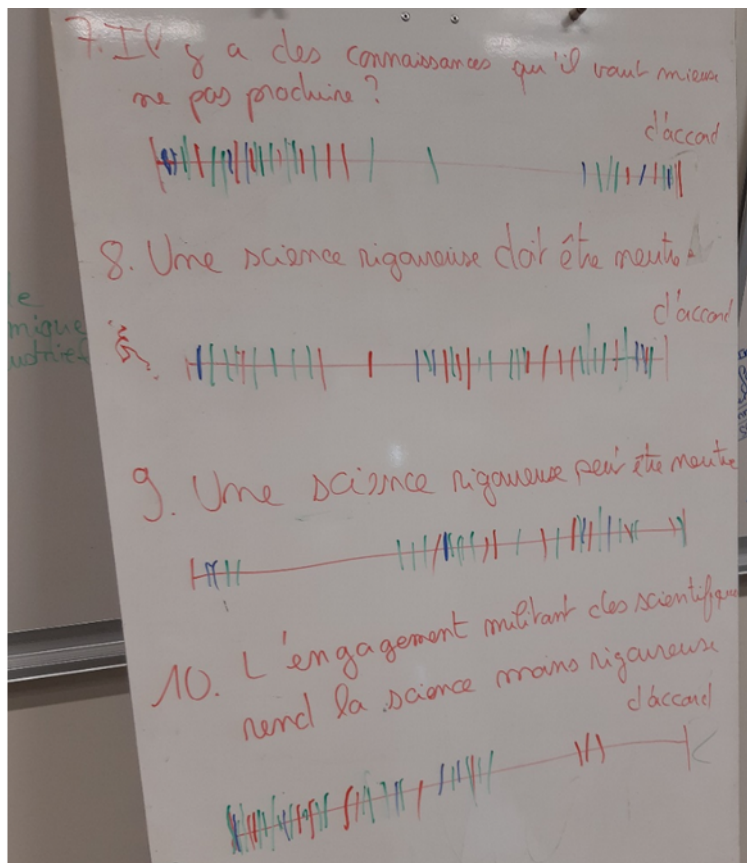


Figure A3. D'accord / pas d'accord : positionnements individuels vis à vis de propositions

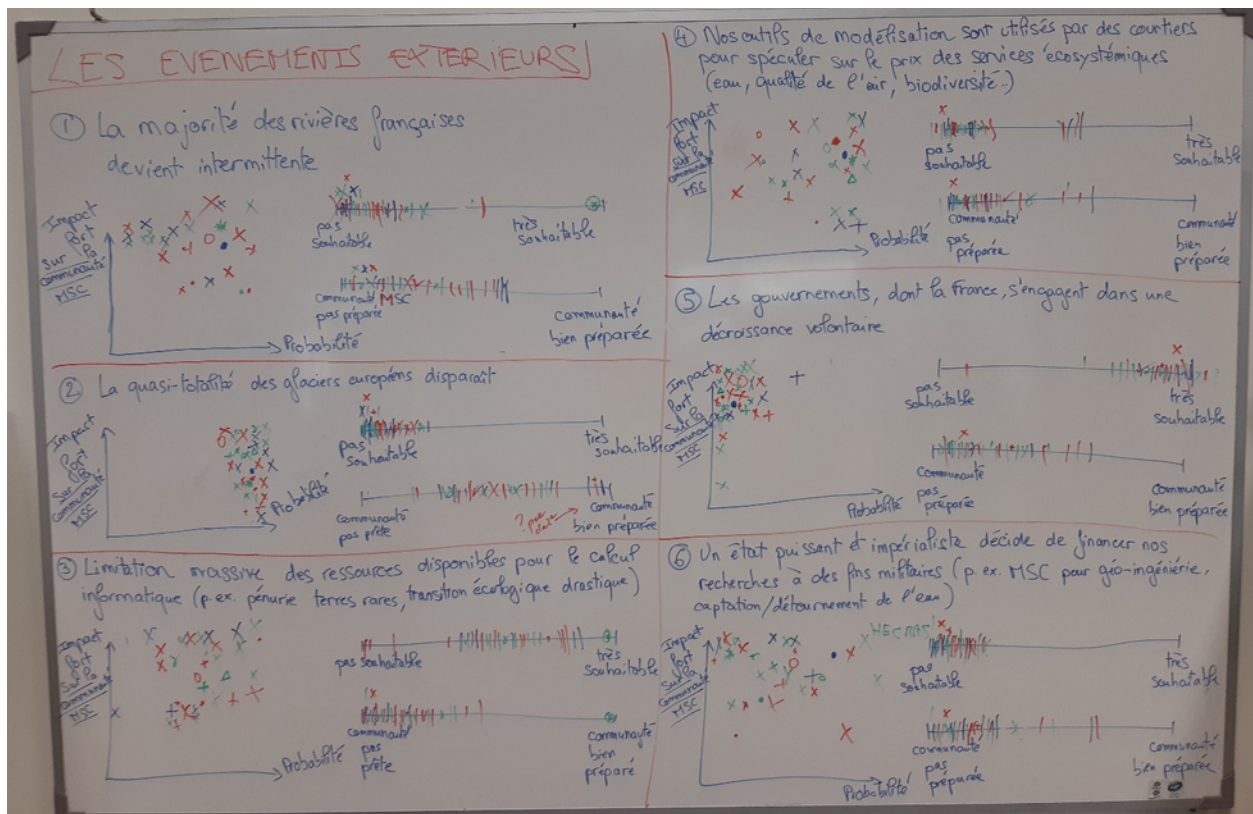


Figure A4 : Positionnements individuels sur le lien entre la communauté MSC et des évènements « extérieurs »

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des perspectives (si adapté) :

Quels verrous ? Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Cette proposition s'insère dans au moins 3 des 6 défis sociétaux : changement climatique , territoires du futur et transition énergétique. Elle propose d'engager une rigoureuse réflexion sur la manière et la raison de faire dans la recherche en SIC, et scientifique au sens plus large.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Modélisation moléculaire de la nucléation et croissance cristalline des minéraux environnementaux
Nom(s) et prénom(s)	Julie Aufort
Adresse(s) mail	julie.aufort@sorbonne-universite.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	x
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	x
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	x
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	x
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	x
22-Autre thème ? (à préciser) : Modélisation moléculaire de la nucléation et croissance cristalline des minéraux environnementaux	x

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

La compréhension des mécanismes à l'échelle moléculaire de formation (nucléation, croissance cristalline) des minéraux à basse température ainsi que de leur altération au contact de la solution (dissolution, reprécipitation) est indispensable en sciences environnementales, aussi bien pour l'étude de la mobilité et du piégeage des éléments contaminants dans les sols et les sédiments dans des stratégies de dépollution, que pour le développement de bioréacteurs reposant sur les propriétés remarquables des interfaces solide-solutions-microorganismes, dans des stratégies de production d'énergie durable et renouvelable. En particulier, la nature, structure, composition chimique et stabilité thermodynamique des premières espèces chimiques impliquées lors de la nucléation des minéraux en solution sont autant de variables qui peuvent gouverner la mobilité ou l'incorporation d'impuretés, la sélection du polymorphe final, le fractionnement isotopique associé, etc. Le caractère hautement transitoire et dynamique de ces espèces (complexes, clusters, colloïdes, hydrates) constitue un défi pour leur étude par des approches expérimentales mais que les simulations numériques, et notamment la dynamique moléculaire, sont capables de relever. La communauté SIC est ici en mesure de s'appuyer sur les avancées récentes en matière de théorie de la nucléation cristalline (voies non classiques, clusters de prénucléation) et de modélisation de celle-ci pour mieux comprendre les mécanismes de formation des minéraux environnementaux.

La modélisation moléculaire de ces processus requiert l'utilisation de techniques avancées de simulation numérique (échantillonnage accéléré) pour améliorer la description et l'évaluation énergétique des processus « rares » dans les durées de simulation actuellement accessibles (adsorption à une interface minéral-fluide, association d'ions et molécules en solution, échange de ligands). Elle nécessite également le développement de méthodes numériques permettant d'accéder à des temps de simulation plus longs tout en conservant un niveau de théorie élevé, comme l'accélération de dynamique moléculaire *ab initio* grâce au machine learning, les approches semi-empiriques réactives à moindre coût computationnel (DFT tight-binding, champs de force réactifs), et le transfert et l'adaptation des codes existants aux architectures GPU et exascale. Enfin, l'exploration des perspectives de modélisation multi-échelles est indispensable pour relier les mécanismes atomiques et moléculaires aux propriétés du milieu continu.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Étudier la biogéochimie des zones critiques frontières -avant qu'il ne soit trop tard
Nom(s) et prénom(s)	Le Roux Gael Hansson Sophia Gascoin Simon Gandois Laure De Vleeschouwer François Teisserenc Roman
Adresse(s) mail	Gael.le-roux@cnrs.fr sophia.hansson@toulouse-inp.fr simon.gascoin@univ-tlse3.fr laure.gandois@cnrs.fr fdevleeschouwer@cima.fcen.uba.ar roman.teisserenc@toulouse-inp.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	X
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	X
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	X
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	X
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	X

12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) : "Zones critiques à étudier"	X

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Étudier la biogéochimie des zones critiques frontières - avant qu'il ne soit trop tard

(Environnements de transition ou extrêmes menacés)

Nous soutenons ici que si les « petits » ou écosystèmes frontières sont potentiellement peu importants quantitativement pour les cycles biogéochimiques mondiaux, *ils préservent un mode unique de fonctionnement biogéochimique des zones critiques et des interactions écologiques* qui méritent d'être étudiés à minima qualitativement avant qu'ils ne disparaissent ou soient transformés en autre chose.

Les écosystèmes frontières comme les zones de haute latitude et/ou haute altitude, les milieux insulaires peuvent être considérés comme des environnements extrêmes ou une transition entre deux écosystèmes (écotone). Nous les définissons ici comme des écosystèmes qui basculeront irrémédiablement au moindre changement environnemental. Les deux définitions sont prises en compte même si notre focus est sur les environnements relativement restreints, de faible surface ou *mal identifiés* pour leur richesse de fonctionnement biogéochimique.

Même avec des stratégies de conservation, ces écosystèmes basculeront (càd disparaîtront ou auront leur fonctionnement biogéochimique radicalement modifié) en raison des changements environnementaux globaux dont le changement climatique et les impacts anthropiques locaux.

Les zones critiques frontières sont le plus souvent mal connues en raison de leur relative inaccessibilité et/ou identité et parce qu'elles sont difficiles à instrumenter ou que toute activité de recherche aura un impact sur elles.

La plupart du temps, leur biodiversité et leur fonctionnement écologique sont mis en avant par les médias, le grand public et les bailleurs de fonds.

Cependant, leurs fonctions et leurs rôles biogéochimiques sont souvent négligés.

Si les grands écosystèmes frontières tels que les mangroves ou les zones de pergélisol sont identifiés comme des zones clés pour les cycles biogéochimiques mondiaux et peuvent bénéficier d'un soutien relatif, les zones plus petites telles que les glaciers tempérés et tropicaux, les déserts et leurs oasis, les zones humides de haute altitude, certaines îles ou écosystèmes îliens ne bénéficient pas d'un tel soutien-intérêt en raison de leur importance relativement faible dans les cycles biogéochimiques mondiaux.

Bien que ces écosystèmes puissent sembler marginaux, ils offrent un mode unique de fonctionnement biogéochimique des zones critiques et des interactions écologiques qui méritent d'être étudiés, ne serait-ce qu'à des fins qualitatives, avant qu'ils ne disparaissent ou soient transformés en quelque chose de différent.

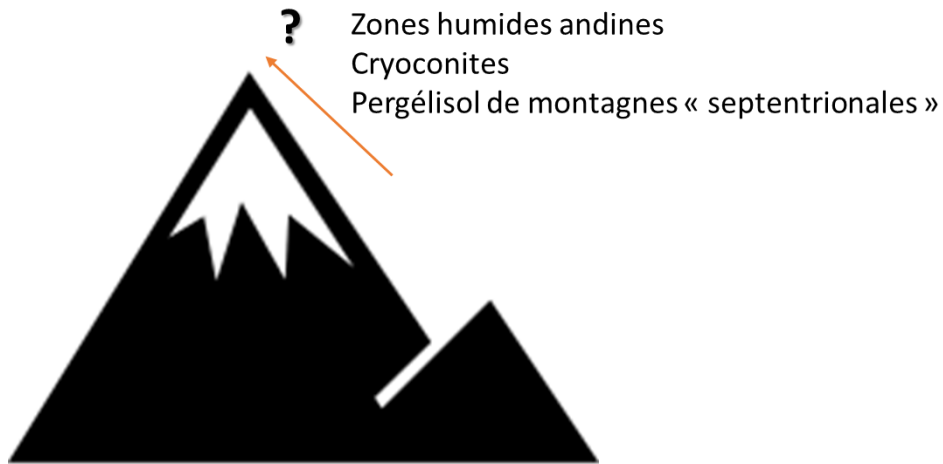


Fig. 1: exemple de composants de zones critiques frontières “peu significatifs à l’échelle globale” mais amené à disparaître à cause des changements globaux

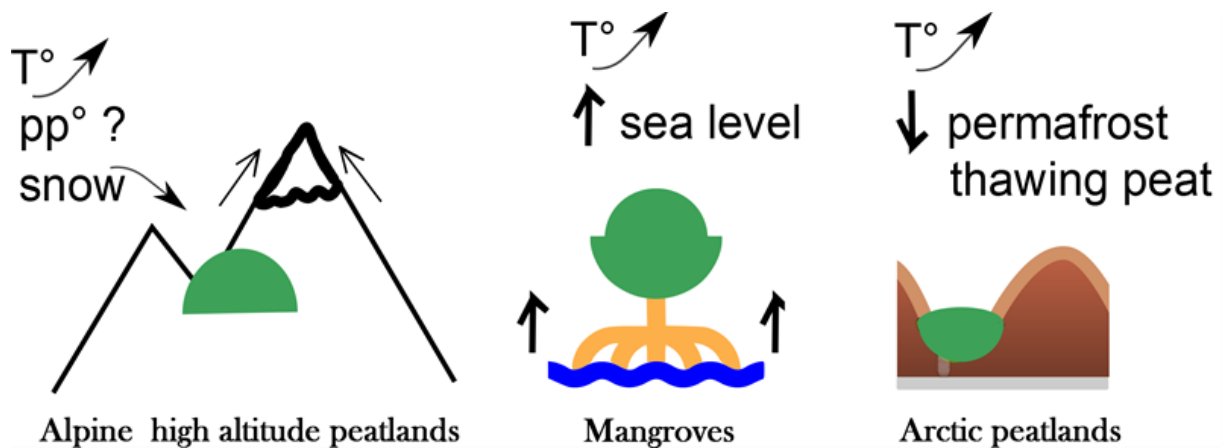


Figure 2 :Schéma simplifié de trois types de zones humides frontières et des impacts du changement climatique. Alors que les mangroves et les tourbières arctiques sont identifiées comme des zones importantes pour les cycles biogéochimiques, les tourbières alpines en haute altitude sont moins prises en compte.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- Isolement et difficulté à accéder aux zones d'étude
- Relatif faible intérêt aux regards des enjeux globaux
- travail interdisciplinaire avec une prise en compte de l'aspect verticale de la Zone Critique

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- méthodo: voir ci-dessous
- soutien institutionnel pour identification auprès des gestionnaires au même titre par ex. que la connaissance et la conservation patrimoniale de la biodiversité
- moyens spécifiquement dédiés en raison de l'urgence"

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

- identifier les Zones Critiques Frontières menacées (à minima sur le territoire français)
- déterminer leur caractère éco-biogéochimique unique et singulier
- étudier ce "patrimoine biogéochimique" unique avant "basculément" et/ou « disparition »
- conserver l'information

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux **(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :**

1. Changement climatique
4. Santé et environnement

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Les bioaérosols : Une problématique interdisciplinaire et des enjeux multiples aux interfaces environnementales
Nom(s) et prénom(s)	Amato Pierre, Binet Françoise
Adresse(s) mail	pierre.amato@uca.fr francoise.binet@univ-rennes.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	X
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	X
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	X
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	X
11-Les contaminants de la Zone Critique	X
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	X
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	X
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	X
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les bioaérosols sont l'ensemble des particules d'origine biologique en suspension dans l'air ou dans l'eau atmosphérique. Cela inclut les pollens, les microorganismes (champignons et levures, microeucaryotes, algues, bactéries, archées, virus), ou encore les débris et excréments d'animaux, de végétaux et de microorganismes (protéines, lipides, etc.). Ils sont présents dans toutes les gammes de taille des aérosols, de quelques nanomètres à plusieurs centaines de micromètres, et peuvent compter pour un tiers ou plus des particules microniques en suspension dans l'air. Leur concentration est très variable dans l'espace et le temps, en fonction du lieu (type de surface adjacente, altitude, etc.) ou encore des conditions environnementales (humidité, turbulence, altitude etc.).

À tout instant, les populations humaines, les systèmes agricoles et les environnements naturels sont exposés à des millions de bioaérosols d'origines diverses et de toutes sortes, avec des effets bénéfiques ou néfastes. Que ce soit en milieu intérieur ou en atmosphère extérieure, le transport par l'air représente une voie importante de dispersion de microorganismes pathogènes (bactéries, virus, champignons...) et de composés allergènes variés (pollens notamment), aussi bien à des échelles spatiales courtes de l'ordre du mètre qu'à des échelles intercontinentales. Les enjeux socio-économiques sont majeurs. La récente crise Covid a bien mis en lumière l'importance des bioaérosols viraux, depuis leur émission jusqu'à leur dépôt dans le système respiratoire, en passant par les mécanismes de leur dispersion aérienne, avec tout ce que cela implique en termes de prévention et de gestion.

En air extérieur, c'est ainsi l'état sanitaire de l'ensemble des êtres vivants, plantes, animaux, humains, écosystèmes en général, qui est en jeu, et leurs effets cumulés avec la pollution atmosphérique et le changement global peuvent être importants. L'état sanitaire de la biosphère dépend des nombreuses interactions entre ses différentes composantes ; ce sont ces interactions qui sont au cœur de la problématique One Health, étroitement liée à une vision holistique de la santé et aux liens entre santé, qualité de l'environnement (eau, sols, air...), climat, alimentation, agriculture et biodiversité.

Le flux permanent de matériel génétique entre écosystèmes et individus les connecte à l'échelle globale et pourrait jouer un rôle important dans leur stabilité et leur sensibilité aux changements. Avec un temps de résidence atmosphérique estimé de 3 à 10 jours chez les bactéries, les échelles spatiales concernées par la dispersion de microorganismes, et plus largement de bioaérosols, sont vastes. Les implications des bioaérosols dans les processus environnementaux et climatiques apparaissent cruciaux pour le fonctionnement de notre planète dans sa globalité. En tant que particules solides, ils participent aux processus (micro)physiques (et chimiques) se déroulant dans l'atmosphère, notamment les phénomènes de nucléation tels que la formation de gouttelettes de nuage et de cristaux de glace, et l'induction des précipitations. Des phénomènes de rétroactions (« bioprécipitations ») couplant végétation, précipitations et bioaérosols démontrent leur rôle capital dans la connectivité entre surfaces, climats et cycles hydrologiques.

Dans les nuages, les microorganismes vivants interfèrent avec les composés carbonés et les oxydants, et probablement également avec des composés azotés et autres, et interviennent dans les cycles biogéochimiques globaux des éléments et le devenir des composés chimiques dans l'atmosphère. Ils pourraient même être en mesure de s'y multiplier et, de ce fait, engendrer des aérosols biologiques secondaires, fixant du carbone et altérant la composition atmosphérique.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Les impacts des bioaérosols sur les processus atmosphériques figurent parmi les thématiques les plus complexes et les moins étudiées au niveau international. Ils peuvent être abordés de diverses manières, très complémentaires, qui illustrent bien l'aspect pluridisciplinaire du sujet (chimie, biologie, physique) et nécessitent une approche transdisciplinaire des acteurs scientifiques en développant des stratégies intégrées d'observation, d'études en laboratoire et de modélisation.

Il s'agit d'une thématique qui porte le potentiel de formation sur l'évaluation de la qualité environnementale, sur l'hygiène et la qualité de vie en entreprise (lien métier métrologie, H&S). C'est aussi une thématique d'intérêt politique : politique de la ville, de gestion des territoires, mise en œuvre de politiques pour l'application des directives européennes sur la qualité de l'air.

Les enjeux de connaissance pour la société sont nombreux, depuis les enjeux sanitaires (le droit de respirer un air sain), enjeux agronomiques (dissémination et écologie aérienne des pathogènes en agriculture), enjeux climatiques etc.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- **Manque de données d'observation** : caractérisation de l'abondance, la composition et la diversité de l'aérobiome, sa distribution spatiale et temporelle à différentes échelles, ainsi que sa dynamique spatio-temporelle.
- **Difficultés techniques et analytiques** : développement et harmonisation de méthodes et protocoles adaptés aux analyses biologiques de traces, prélèvements invasifs vs non-invasifs, automatisation et coordination des observations, archivage des données ;
- **Besoin de développement des connaissances fondamentales** des mécanismes moléculaires, physiques, chimiques, écologiques et évolutifs en jeu dans l'émission des bioaérosols, leur devenir, leur comportement dans l'air (viabilité, activité, infectiosité, pathogénicité, intégrité physique etc) et leurs déterminants biotiques et abiotiques. Quels types de données liées aux bioaérosols faut-il acquérir en laboratoire ou sur le terrain ? Quels types de traceurs ou de biomarqueurs peuvent être utiles et utilisés ? Quels sont les moyens intermédiaires capables de combler le trou d'échelle entre les expériences de laboratoire et les modèles atmosphériques 3D et les modèles climatiques ?
- **Cloisonnement disciplinaire**, sur un sujet aux interfaces. Nécessité de décroisonner pour partager les avancées et lever les verrous. Comment faciliter les échanges entre des communautés qui interfèrent peu ou pas, mais dont les objectifs scientifiques peuvent être chevauchants et liés ?

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- **Instrumentaux et méthodologiques** : développement de capteurs low-cost, amélioration de la capacité observationnelle, intégration des données ou traceurs dans les modèles atmosphériques pour établir les impacts des bioaérosols sur les processus étudiés, éventuellement pour de l'opérationnel.
- **Ressources humaines** : Le sujet est très interdisciplinaire, depuis la rhéologie et la météorologie à l'écologie, la biologie moléculaire et les sciences du climat. Il est donc nécessaire de former et déployer des ressources humaines à tous niveaux, depuis l'opérationnel sur le terrain à la modélisation numérique.
- **Sémantiques** : définir une nomenclature et cibler des objectifs communs aux interfaces disciplinaires ; faciliter/promouvoir les échanges entre les différentes disciplines concernées

(microbiologistes, écologues, physiciens de l'atmosphère, chimistes, climatologues, agronomes, médecins etc). Par exemples, quelle définition exacte donner aux bioaérosols ? Comment les classer selon leur spécificité (p. ex. pollens vs bactéries vs macromolécules, etc.) ? Quelles sont les spécificités importantes à considérer pour chaque type de processus atmosphérique ou écologique ?

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

- **Développement d'instrumentation et d'outils spécifiques, des réseaux d'observation**, pour la captation, l'archivage, la caractérisation et l'analyse des bioaérosols, et le stockage/partage des données ;
- **Quantification des flux à l'interface surface/atmosphère** (émissions et dépôts) et de leurs dépendances aux types de surfaces, aux conditions météorologiques ou encore climatiques, essentielle à l'élaboration de modèles de dispersion et aux études d'impacts, qu'ils soient sanitaires, environnementaux ou climatiques, ainsi qu'à l'appréhension des situations futures dans le cadre du changement global.
- **Caractérisation de l'effet du transport et du vieillissement** des bioaérosols sur leur viabilité, leur virulence, et leurs interactions avec les processus physico-chimiques atmosphériques, avec pour objectif le développement de modèles de dispersion microbienne, de processus atmosphériques, ou encore d'épidémiologie ;
- **Appréhension du devenir, des impacts et rôles régulateurs** des bioaérosols sur les écosystèmes et les populations des bioaérosols. Cela passe par l'identification des milieux prioritaires à étudier, la caractérisation de la représentativité des modèles de laboratoire par rapport aux comportements réels des bioaérosols, ou encore de l'importance de leur représentation dans les modèles de dispersion et de processus atmosphériques et écologiques. Les physico-chimistes de l'atmosphère doivent définir des conditions ou des processus pour lesquels les bioaérosols peuvent être en partie responsables de phénomènes inexplicables. Les écologues et épidémiologistes doivent définir des zones d'intérêts biogéographique, démographique ou d'usage pour lesquelles des questions d'échanges de matériel biologique via l'atmosphère se posent. Les milieux prioritaires guideraient les expériences de laboratoire permettant le développement des modèles numériques, validés expérimentalement et par l'observation.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Le thème des bioaérosols se positionne dans 4 des 6 grands défis sociétaux identifiés par le CNRS :

• Changement climatique

Le changement global influence les flux aux interfaces continentales et la biodiversité, et impacte donc l'abondance, la diversité des bioaérosols, leur viabilité, leur capacité de dispersion et d'invasion, et leurs interactions avec les cycles biogéochimiques et hydrologiques. En retour, les bioaérosols, en tant qu'acteurs de processus physiques et chimiques atmosphériques ou de régulations écologiques sont à considérer dans la prise en compte du changement global (invasions biologiques, éco-épidémiologie, climatologie, ...).

• Intelligence artificielle

Les outils d'IA peuvent bénéficier à une meilleure intégration des données pour une compréhension accrue des multiples facteurs physiques, biologiques, environnementaux ou autres régissant les

caractéristiques quantitatives et qualitatives des bioaérosols et de leurs impacts, et aides aux changements d'échelle nécessaires.

- **Santé et environnement**

Les bioaérosols sont au centre de problématiques sanitaires et environnementales : pathogènes, allergènes, dispersion de fonctions biologiques (antibiorésistance, etc), régulation des écosystèmes par transfert de gènes, etc.

- **Territoires du futur**

Les bioaérosols interviennent dans les problématiques de pollution (accroissement des allergies, etc), de régulation de la biodiversité (dispersion, épidémiologie, etc), ou encore de gestion des agroécosystèmes et de leur capacité de résilience face aux stress liés à des facteurs biotiques et abiotiques.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Formation et maintien des compétences des IT
Nom(s) et prénom(s)	Labasque Thierry (DAT INSU) – Clémence Agrapart (CMFI INSU)
Adresse(s) mail	Thierry.labasque@cnrs.fr ; clemence.agrapart@cnrs.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :transverse : formation et maintien des compétences des IT	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Le recrutement et le maintien des compétences professionnelles des IT sont importants pour mener les projets scientifiques qui s'appuient notamment sur les outils au sein des IR du domaine ainsi que les plateformes et service dans les OSU et les UMR. Il s'agit ici d'identifier les compétences techniques nécessaire au domaines, par un bilan des effectifs par métiers et une projection à 5 ans. Une projection à plus long terme doit permettre notamment d'identifier les besoins en métiers de demain (big data, IA, nouveaux instruments, capteurs innovants, ...) et de les décliner en recrutement ou en formation

L'offre des réseaux métiers du CNRS/INSU et de la MITI (ANF) doit être mieux utilisée pour maintenir les compétences de métiers spécifiques et originaux (Lithopréparateurs, Milieu souterrain et Karst, RTCE, MAPI,).

L'apprentissage doit être favorisé afin de constituer un vivier de personnes et de compétences à la spécificité des métiers des UMR. Un lien avec les écoles/CFA est également créé à ces occasions.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Métiers nécessaire au fonctionnement des plateformes souvent mutualisés à l'échelle des OSU., des et des IR.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- *Effectifs IT sous tension*
- *Attractivité des EPST*
- *Liens avec les Masters, IUT, Ecoles d'ingénieurs*
- *Métiers spécifiques/spécialisés*
- *Nouvelles compétences*

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- *Mener une analyse de gestion prévisionnelle des emplois et des compétences du domaine (et aux IR associées) – GPEC*

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

- GPEC du domaine SIC
- Déclinaison en perspectives d'embauches et plan de formations associé à la MITI
- Déclinaison en organisation en plateformes, services mutualisés
- Développement de la notion de projet (mise à disposition d'IT pour une durée du projet) dans les projets de recherche du domaine
- Développement de formations pour accompagner les nouveaux métiers

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Eau dans la ville
Nom(s) et prénom(s)	Perrin Jean-Louis
Adresse(s) mail	jean-louis.perrin@umontpellier.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	X
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	X
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	XX
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	X
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

L'eau est l'un des défis actuels majeurs des zones urbaines et péri-urbaines. Elle doit y être considérée comme une menace (ruissellement, crues éclairs, inondations), comme une ressource (alimentation en eau potable, industrie, loisirs), comme un vecteur (transfert de contaminants ou plus généralement de matière vers des milieux récepteurs souvent fragilisés par la pression anthropique), mais aussi comme un milieu (écosystèmes propices au développement d'une biodiversité). L'eau et les problématiques qui y sont associées sont exacerbées en contexte climatique méditerranéen (fortes précipitations, sécheresses récurrentes, écoulements intermittents des rivières, tourisme estival), a priori le plus sensible au changement climatique.

Le milieu urbain concentre donc la population, les pressions exercées sur le milieu, mais aussi les enjeux humains et économiques et donc les risques au sens large du terme. Cette concentration joue non seulement sur les échelles spatiales, mais aussi sur les échelles de temps. Dans un contexte de changement climatique, les contributions respectives du climat et de l'urbanisation/artificialisation des sols sont encore mal identifiées.

Bien que l'urbain soit un objet scientifique important et intéressant, il reste, finalement, à ce jour, peu reconnu, longtemps associé à la seule ingénierie. L'objet urbain ne peut être appréhendé que sur les bases d'une démarche transdisciplinaire, dans le domaine de l'eau, toutes les disciplines de l'hydrologie/hydraulique, mais aussi la chimie, la microbiologie, la santé et les sciences humaines et sociales.

Quelques pistes :

Précipitations et crues urbaines.

L'échelle pertinente pour l'appréciation du risque hydrologique urbain est de l'ordre de la centaine de mètres. Ceci vaut pour les champs inondants comme pour les précipitations qui génèrent les crues pluviales. Une telle résolution est significativement inférieure à celle des produits météorologiques standard (pixel radar Météo France de résolution 1 km x 1 km).

Deux actions sont nécessaires : (i) développer des méthodes de désagrégation permettant de déduire les champs à une résolution hectométrique à partir des produits à résolution kilométrique en se basant sur les données d'un observatoire mis en place à cette échelle (blocs urbains, quartiers), (ii) développer des modèles robustes et rapides pour la gestion de crise : modèles hydrologiques spatialisés, hydrauliques à porosité, conceptuels, en faisant par exemple appel à une régionalisation des paramètres.

Rendre la ville « poreuse » est souvent avancé comme un procédé, basé sur les solutions fondées sur la nature, permettant de mieux gérer les flux d'eau dans la ville, limiter les investissements lourds (réseaux de drainage, évacuation des crues, etc.). Cette démarche n'est que rarement mise en œuvre de manière holistique en considérant l'ensemble des composantes du cycle de l'eau et là, en l'occurrence, les eaux de crue et les eaux souterraines. Comment s'assurer du réel cheminement des eaux infiltrées (efficacité/risques) ? Comment créer des volumes disponibles au sein des nappes urbaines pour anticiper les événements de la saison des pluies (en lien avec le volet « ressources en eau » urbaines ci-dessous) ?

Ruissellement et contaminants.

L'objectif serait de développer et d'appliquer des modèles pour déterminer comment les apports et les transferts de contaminants chimiques et microbiologiques sont susceptibles d'évoluer en fonction de la dynamique du territoire urbain et/ou de l'évolution climatique.

Trois actions sont nécessaires (i) identifier les activités humaines à l'origine des contaminants et évaluer, à l'aide de modèles ou d'observations, le rôle des différents aménagements urbains dans le stockage des contaminants, (ii) caractériser les processus d'accumulation et de remobilisation dans les aménagements et les cours d'eau urbains, en développant des protocoles d'observation in-situ des flux de contaminants dissous et particulaires durant et hors des épisodes pluvieux. La mise en place de microcosmes permettra de caractériser les processus physico-chimiques (sorption, dégradation, etc.). Un exemple typique d'application concerne les zones littorales urbaines, où les apports du bassin versant jouent un rôle essentiel pour la qualité des eaux de baignade, (iii) mieux comprendre les relations existantes entre les concentrations et les flux des différents contaminants considérés de façon à modéliser leurs dynamiques à partir de proxys facilement mesurables en continu comme la conductivité (pour les éléments dissous) et la turbidité (pour les éléments particulaires), (iv) impacts sur la santé humaine et les écosystèmes urbains (antibiorésistance, ecotoxicité).

Hydrogéologie urbaine - Ressources en eau urbaines

La couverture très urbanisée de l'impluvium des nappes urbaines (nappe de l'Astien à Montpellier ou du Continental Terminal à Abidjan par exemple) engendre des problématiques particulières de qualité des eaux des nappes et influence leur fonctionnement hydrodynamique.

Trois actions sont nécessaires ; (i) évaluer l'impact de l'urbanisation sur le comportement hydrodynamique d'une nappe d'aquifère poreux, en analysant l'impact de l'urbanisation (imperméabilisation des sols, fuites de réseaux, ouvrages souterrains...) sur les modes de recharge, de fonctionnement et les réactions aux événements pluvieux intenses ; (ii) estimer la contamination des eaux souterraines par les activités anthropiques urbaines et identifier les traceurs les plus pertinents ; (iii) établir une méthodologie d'étude de nappe adaptée au contexte urbain.

Par ailleurs, l'exploitation de certaines de ces nappes urbaines a été abandonnée pour des problématiques de qualité par exemple. La question de l'intérêt de la valorisation de cette ressource (climatisation, substitution de l'eau potable pour des usages moins nobles : arrosage des espaces verts, réduction des îlots de chaleur, stockage d'eaux usées traitées...), création de volumes disponibles pour rendre la ville plus poreuse, ... doit être évaluée à l'aune des éventuels risques associés, liés notamment à la qualité de ces eaux.

Paramétrage des modèles.

Les modèles d'écoulement et de qualité des eaux urbaines doivent être paramétrés. L'acquisition à cet effet de données in situ reste coûteuse en temps et en moyens. Elle se complique souvent de problèmes d'accessibilité et de contraintes physiques ou sécuritaires. La généralisation des bases de données ouvertes et des informations en ligne ouvre des pistes nouvelles pour la recherche de données et d'informations.

Trois actions sont nécessaires : (i) mettre en place des méthodes de fouille et d'analyse de données adaptées aux objets urbains, intégrant aussi le recueil d'informations participatives (vidéos des habitants, informations sur le fonctionnement des essuie-glace des véhicules, etc.) ; (ii) utiliser des produits géomatiques (images aériennes, etc.) pour identifier des proxys permettant d'estimer les paramètres des modèles, (iii) fusionner les données en tenant compte des incohérences et propager les incertitudes le long de la chaîne de modélisation.

L'observation joue un rôle essentiel, elle nourrit et se nourrit des quatre activités de recherche présentées au paragraphe précédent. Pour renforcer les interactions entre les différentes

thématiques concernant l'eau en milieu urbain, la mise en place d'un ou plusieurs observatoires doit compléter cette démarche. Il aura pour activités principales d'identifier les besoins en observations et de produire les données nécessaires à la recherche. La gouvernance de cet observatoire doit être assurée sur la base d'une représentation par discipline scientifique et technique : chimie, hydrologie, hydrogéologie, hydraulique, microbiologie/bactériologie, métrologie, spécialités terrain, développement de réseaux au Sud et de prioriser des demandes de moyens et d'équipement.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Les recherches au sein des sciences de la Terre et du vivant comme au sein des sciences Sociales intéressées par l'eau sont très diverses, ne communiquent pas toujours, voire ne sont pas d'accord entre elles, et ce d'autant plus lorsqu'elles tentent de prendre en compte l'action humaine sur leurs objets. A cette diversité interne au champ scientifique répond une division propre à l'action publique dont l'approche sectorielle constitue de longue date un obstacle à la gestion intégrée de l'eau, en particulier en ville. Dans ce contexte, il s'agira de mettre en place des dispositifs et une recherche spécifique visant produire, et à accompagner la production et la diffusion, d'une science de l'eau urbaine utile aux politiques publiques avec trois grands objectifs : (i)-assembler la production de connaissances scientifiques autour de l'eau en faisant dialoguer sciences de la Terre et sciences sociales ayant des terrains urbains au Nord, comme au Sud, (ii) produire une science de l'eau utile à l'action publique par une forme de recherche coopérative ancrée sur ses terrains d'étude/observatoires, (iii) analyser/diffuser cette approche par les réseaux transnationaux de recherche, d'action publique, et de la société civile.

Une autre piste pourrait concerner la mise en place de dispositifs de type Urban Living Labs, dans lesquels des acteurs des territoires (en particulier les collectivités), de la recherche (les universités, EPST), du milieu associatif (actions participatives) et du milieu économique (économie verte) co-construisent des solutions fondées sur la nature au bénéfice de la biodiversité, des territoires et de la population. Un Living Lab vise à la fois à produire des connaissances académiques et à permettre à des acteurs de la société et de la recherche de travailler et de mener des expérimentations ensemble, autour d'une question d'intérêt commun, ici, l'EAU. Couplé à des observatoires, ces Urban Living Labs pourrait devenir de puissants outils de développement durable pour les zones urbaines ou péri-urbaine associant acteurs académiques / acteurs économiques / acteurs politiques en un groupe vertueux. Dans un premier temps, ces expériences pourraient être menées à l'échelle de quartiers, de sites universitaires ou hospitaliers et même de sites industriels, pour trouver des solutions locales à des problèmes planétaires.

Projection aux Suds / Echanges N-S, S-N, SS pour la transposition des méthodes / protocoles / solutions

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)

Les données et leurs échelles spatiales et temporelles d'acquisition

Les moyens humains de la recherche

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux
(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Osons un observatoire à long terme (30 ans) des impacts anthropiques des éoliennes en mer et du changement climatique
Nom(s) et prénom(s)	<ul style="list-style-type: none"> - UMR M2C (Bennis Anne-Claire, Abcha Nizar, Furgerot Lucille, Pezy Jean-Philippe) - UMR BOREA (Niquil Nathalie, Claquin Pascal) - UMR LOG (Alekseenko Elena, Lasram Frida, Sentchev Alexei, Schmitt François) - UMR METIS (Rejiba Fayçal) (collab. envisagées : UMR LOMC et LOPS, Ifremer, CNAM, Shom, CSLN et FEM)
Adresse(s) mail	anne-claire.bennis@unicaen.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X Principal
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	Secondaire
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	Secondaire
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	Secondaire
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	

18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	X Principal
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Cette contribution émerge principalement dans les thèmes « 21. Énergie et transition énergétique dans les SIC » et « 1. Observations ». **Nous aimerions voir émerger des discussions autour de la création d'un observatoire à long terme (30 ans) des impacts de l'éolien en mer et du changement climatique dont les données seraient accessibles à la communauté scientifique.**

De façon secondaire, elle peut également être reliée aux thèmes « 8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental » et « 9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques » dans une démarche couplée milieu - vivant et au thème « 12-Le continuum Homme/Terre/Mer » par son extension vers les acteurs en interaction avec les changements dans l'écosystème.

En effet, dans les 5 prochaines années, les parcs éoliens posés en France sur les façades Atlantique, Manche et sud de la mer du Nord, vont être mis en service (St Nazaire : 2023, St Brieuc : 2023, Courseulles s/mer : 2024, Fécamp : 2024, Dieppe-Le Tréport : 2026, Dunkerque : 2028). Dans un souci de responsabilité environnementale et sociétale, il est fondamental de pouvoir quantifier les impacts des fondations éoliennes à long terme par des observations *in situ*. Cette réflexion vient faire suite du projet DRACCAR (2023-2027, cofinancement de la Région Normandie et de l'Union européenne) dans lequel un mât de mesures éolien expérimental sera instrumenté pendant 4 ans et démonté en 2027 par son propriétaire France Énergies Marines. La géométrie de ce mât diffère de celle finalement adoptée pour les fondations définitives du parc de Fécamp ce qui représente un biais dans les études en cours.

Le financement de la recherche actuelle par projets, dont la durée varie de 1 à maximum 10 ans pour les plus longs, rend actuellement impossible ce type d'observatoire à long terme. Pourtant, un tel observatoire permettrait d'apporter des réponses en termes d'impacts environnementaux pour conseiller et adapter (au besoin) les futures politiques gouvernementales en matière de décarbonation de l'énergie via le développement des Énergies Marines Renouvelables dans un contexte de changement climatique.

De plus, cette identification des impacts est une demande récurrente des acteurs locaux, et en particulier des usagers de l'espace maritime comme les pêcheurs, les plaisanciers, les professionnels du tourisme et des habitants locaux toutes professions confondues. Bien que les parcs soient souvent instrumentés par les concessionnaires, les données sont rarement rendues publique rendant impossible la recherche à long terme sur ces sites. Or un suivi à long terme est nécessaire pour donner une description de la dynamique des écosystèmes marins, sous la pression aussi bien des changements locaux que globaux et en particulier climatiques et des conséquences de ces changements pour les acteurs.

Nous proposons de mesurer les caractéristiques hydro-sédimentaires, physico-chimiques et géophysiques de l'environnement à proximité d'un mât d'une éolienne ou plusieurs éoliennes, pour étudier notamment l'impact à long terme des effets de sillage, des chocs hydrodynamiques, des mouvements sédimentaires (effet sur les stocks), de l'augmentation de la température, de l'acidification des eaux... Ces mesures seront complétées par des suivis sur les compartiments biologiques (phytoplancton, zooplancton, benthos, poissons démersaux) permettant de décrire la structure et le fonctionnement de l'écosystème et comment il est impacté par ces constructions en mer (effet récif, rôle biogénique des communautés de substrats durs dans l'écosystème). Un développement méthodologique sera associé afin d'automatiser le suivi du vivant, en combinant approches traditionnelles, avec les approches omiques telles que l'ADN environnemental, isotopiques, acoustiques et toutes autres technologies émergentes.

Cette proposition d'observatoire à long terme s'insère naturellement dans les différents SNO (Service Nationaux d'Observation) de l'Infrastructure de Recherche ILICO, comme par exemple le SNO COAST-HF et le SNO BENTHOBS avec la mise en place d'un suivi à long terme des différents compartiments biologiques en baie de Seine (approche écosystémique).

Cette proposition est remontée via l'INSU mais des échanges avec les collègues d'autres instituts du CNRS, en particulier l'INSHS et l'INEE, seraient souhaitables pour obtenir une évaluation globale des impacts des éoliennes, qui inclurait les impacts sur les socio-écosystèmes, sur l'économie de la mer et sur la perception de ces nouvelles constructions par la population (continuité du projet EOENMER financé par l'ADEME).

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Cette contribution relève de la responsabilité environnementale en instrumentant une structure déjà existante (ie. une fondation éolienne) par des capteurs permettant d'analyser les impacts à long terme des éoliennes sur la dynamique hydro-sédimentaire et les écosystèmes. Il est de notre responsabilité d'appréhender sur le long terme les impacts de ces nouvelles structures en mer.

Un effort sera fait de la part de l'équipe scientifique pour réduire l'impact carbone autant que possible, et aller vers une recherche bas carbone, en minimisant les interventions en mer (par ex. mutualisation de campagnes, utilisation de navires électriques, réduction des opérations de maintenance) et en utilisant des technologies/instruments bas carbone (par ex. effets de proximité, matériau recyclé d'une durabilité renforcée).

Ce projet permettra de recruter des personnels techniques dédiés à cet observatoire sur une durée significative (ie. plusieurs années), créant de l'emploi durable dans les territoires.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

1. Instrumentation de la structure (par ex. accès, autorisation de travaux, déploiement d'instruments en mer)
2. Alimentation énergétique des instruments de l'observatoire
3. Accessibilité aux données *in-situ* existantes

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

1. Moyens nautiques des stations marines, des exploitants des parcs éoliens et de la flotte océanographique,
2. RH/métiers : technicien(ne) en électro-mécanique, ingénieur(e) en instrumentation scientifique marine ; ingénieur(e) de recherche en approches écosystémiques (ADN environnemental, isotopes, modélisation) ; ingénieur(e) d'étude en taxonomie benthique
3. Instruments de mesure en complément de ceux à disposition dans les laboratoires ou à la DT INSU.

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

1. Formation/autorisation
2. Moyens nautiques
3. Achat des instruments/capteurs
4. Recrutement des personnels permanents
5. Conception de la station (structures de fixation, réflexion sur l'alimentation de la station puis le stockage et le partage des données)

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Cette fiche se positionne dans deux défis sociétaux identifiés par le CNRS : i) Défi 1. Changement climatique, ii) Défi 6. Transition énergétique

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	
Nom(s) et prénom(s)	Delphine SIX au nom de la communauté du SNO GLACIOCLIM
Adresse(s) mail	delphine.six@univ-grenoble-alpes.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	X
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	X
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	X
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	X
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les enjeux du suivi de la cryosphère (neige, glaciers, calottes) pour sont capitaux pour la société à l'échelle mondiale comme locale, tant en terme de potentiel de montée du niveau des mers, de disponibilité des ressources en eau ou de risques naturels associés (avalanches de neige et de glace, crues glaciaires, rupture de poches glaciaires, débâcles de lacs glaciaires, déstabilisation de glaciers...). Les incertitudes associées restent cependant élevées en partie parce que les stocks actuels, les bilans de masse et d'énergie des surfaces enneigées et englacées, et les projections climatiques sont encore mal observés, contraints, compris et/ou simulés dans ces régions de hautes latitudes ou de hautes altitudes à topographie complexe. Un effort important doit donc être poursuivi sur les observations de long terme ponctuelles et leur spatialisation, via une instrumentation innovante (répondant au défi 1, *changement climatique*). Associés à ces observations, des efforts doivent être maintenus sur la compréhension des processus et sur la modélisation future de cette composante majeure de notre planète.

Un effort tout particulier est nécessaire sur le couplage du compartiment cryosphère avec les autres compartiments du système climatique que sont l'atmosphère et les océans. Ce couplage est essentiel du point de vue des observations. Par exemple des campagnes spécifiques doivent être menées sur l'influence du dépôt des aérosols ou du carbone suie sur le manteau neigeux, sur le rôle de la sublimation de la neige et de la glace ou les transferts de chaleur dans les glaciers froids en particulier via la percolation d'eau liquide, sur le rôle des réseaux hydrologiques supra, intra et sous-glaciaire dans la dynamique des glaciers (fragilisation et fracturation hydraulique des plate-forme, glissement à la base des glaciers, etc.), sur le transport et la redistribution de la neige sur les calottes polaires ou en montagne, sur l'importance des marées, de la houle, de la fonte sous-glaciaire mais aussi des événements de fonte extrême (rivières atmosphériques) sur la stabilité des plateformes et des glaciers émissaires des calottes, etc..., sur la contribution des avalanches aux bilans des glaciers, etc... Ces exemples montrent la variabilité spatiale et temporelle des hétérogénéités de surface affectant les échanges d'énergie et de masse entre l'atmosphère, l'océan et les surfaces enneigées et englacées et de fait, leur complexité de mesure. En outre, ces observations doivent s'inscrire dans une logique de long terme (ex. transport de neige, quantification des flux turbulents).

En effet, seules des observations de long terme (i.e. pluri-décennales) apportent à nos communautés comme à la société le recul nécessaire pour décrypter les changements d'origine naturelle ou anthropique et pour dégager des tendances dans la variabilité climatique. La poursuite de ces observations pose cependant certaines questions vis-à-vis : i) de la qualification des mesures (problème d'inter-calibration, suivi long terme des instruments, métrologie, standard internationaux) ; ii) des évolutions techniques nécessaires (incluant autonomie, télétransmission) mais en recouvrement avec l'instrumentation existante ; iii) de la bancarisation des données (portails de diffusion unifiés, redondance avec les réseaux internationaux...). Des moyens tant techniques qu'humains sont nécessaires pour améliorer ou développer ces différents points. La structuration française actuelle autour des Services Nationaux d'Observation et des postes CNAP associés est un vrai atout, une spécificité française qu'il faut maintenir et renforcer. Le rattachement des SNO aux IR permet également une transversalité avec d'autres compartiments (ex. l'hydrologie en ce qui concerne les glaciers). Le lien avec les collectivités ou décideurs locaux, s'il est déjà très prégnant concernant les observations de la neige et de la glace (gestion des aléas d'origine glaciaire et nival), pourra également être développé dans ce contexte, tout comme le lien avec d'autres disciplines (écologie, biodiversité, etc...).

Le défi des observations long terme repose également sur le fait de concilier les diverses échelles considérées (spatiales/temporelles). Et les questionnements autour de la spatialisation/régionalisation de ces observations restent prégnants. De nombreuses initiatives sont instaurées par les observateurs de la cryosphère à l'aide d'instruments dédiés comme le LiDAR, les drones, les données aéroportées et satellites qui permettent d'observer la plupart de nos variables d'intérêt à différentes échelles spatiales et temporelles. En particulier, les données optiques et radar acquises de manière systématique par les satellites du projet Copernicus de l'ESA (Sentinel-1 et -2) permettent de suivre à l'échelle globale les évolutions spatiales et temporelles d'un grand nombre de variables d'intérêt pour la cryosphère (étendue du couvert neigeux, période de fonte, état de surface des glaciers, vitesses d'écoulement, etc...). Cependant, ces données sont pléthoriques (des téraoctets par jour) et impliquent par conséquent une évolution de nos pratiques en termes de chaînes de traitement, d'archivages, et de mise à disposition des produits dérivés.

Ce changement d'échelle se fait également par le biais de campagnes spécifiques comme les raids en terre polaire permettant de documenter le bilan de masse sur de grandes distances. Par ailleurs, des développements techniques récents que nous avons mis en œuvre nous permettent de suivre certaines variables comme la fonte glaciaire en continu et en temps réel. Au-delà de nous permettre de mieux comprendre les processus à court pas de temps, la problématique du traitement et de la gestion des grandes bases de données fait appel à des compétences nouvelles qu'il faut développer.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- Comprendre les processus à l'origine des déstabilisations des glaciers et des calottes (fracturation hydraulique, régime thermique, rôle de l'hydrologie sous glaciaire, rôle de l'usure des plateformes par la flexure et les contraintes générées par la houle et les cycles de marées) est fondamental

- Développer des observations plus fiables pour réduire les incertitudes et améliorer notre compréhension des interactions entre surfaces enneigées/englacées et de la couche limite atmosphérique (neige soufflée, bilan radiatif, flux turbulents, couches stables). Certaines mesures physiques (rugosité surface, albédo, redistribution par le vent), doivent être complétées par des approches chimiques et isotopiques indispensables à l'estimation de la sublimation et des processus de diffusion dans la neige/névé.

- Le passage à l'échelle, c-à-d la capacité d'extrapoler vers la plus grande échelle, des processus observés/compris à petite échelle mais présentant des variabilités spatiales importantes à différentes échelles imbriquées, est critique notamment pour la représentation dans les modèles de climat de processus clés pour des rétroactions climatiques impliquant la cryosphère, mais aussi pour améliorer le réalisme physique des modèles et limiter les compensations d'erreurs. Un continuum d'observations de la fine échelle vers la grande échelle, rendu en partie possible par la télédétection spatiale, est un atout considérable dans cette entreprise mais suppose de lever certains verrous concernant l'exploitation de l'observation satellite notamment.

- Comprendre et modéliser les évolutions de l'albedo (en réponse aux précipitations mais aussi aux dépôts d'aérosols : black carbon, dust...) pour en appréhender l'impact sur l'évolution de la cryosphère et du climat, processus de surface

- Rôle du couplage neige/glace-atmosphère dans les circulations atmosphériques à petite échelle ; implications à plus grande échelle spatiale pour la structure (notamment thermique) de l'atmosphère et la circulation atmosphérique en général

- Développer des chaînes de traitement pouvant « absorber » le flux de données images accessibles (besoin de s'appuyer sur le développement de centre de calculs locaux/nationaux) ; améliorer le traitement algorithmique des zones de distorsion géométriques, très présentes en terrain complexe ; progresser dans la fusion de données (notamment satellite mais pas que) pour améliorer et caractériser la fiabilité des données post-traitées.

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) *Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- Renforcement des liens entre les communautés climat et physique de la neige et de la glace, en gros les liens petite-moyenne-grande échelle entre les différents laboratoires (CNRM, IPSL, IGE, LSCE ...)
- Renouvellement des effectifs d'expertise en physique de la neige. Augmentation des effectifs en hydrologie, hydrologie sous glaciaire
- Renforcement des liens avec d'autres disciplines (math. appliquées dont IA, attribution)
- Recrutements dans ces disciplines + formations à l'usage des GPUs
- Recrutement d'instrumentalistes

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Défi 1 : Changement climatique

Voir plus haut contribution libre

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Réactivités des colloïdes et (bio)interfaces complexes de pertinence environnementale : l'importance des petites échelles.
Nom(s) et prénom(s)	Duval Jérôme
Adresse(s) mail	jerome.duval@univ-lorraine.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	X
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	X
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

A l'heure où les enjeux climatiques grande-échelle occupent une place médiatique importante et évidemment légitime, cette brève contribution vise à souligner/rappeler l'importance des études petites échelles dans la compréhension des processus réactifs aux interfaces de pertinence environnementale (interfaces biologiques et non biologiques). S'inscrivant dans la communauté menant de telles études, l'équipe PhySI (Physicochimie et Réactivité des Surfaces et Interfaces) du LIEC (Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux, UMR 7360, Nancy) a pour objectif l'évaluation des relations complexes entre propriétés physico-chimiques des surfaces ou biointerfaces, et leurs réactivités dans des contextes couvrant des problématiques de société-environnement (e.g. écodynamique des contaminants métalliques) et santé-environnement (e.g. adhésion cellulaire, nanotoxicologie). L'équipe PhySI s'attache ainsi à mesurer, qualifier et modéliser les couplages opérationnels entre processus biologiques, chimiques et physiques afin de parvenir à une meilleure compréhension - mécaniste et intégrative - de la réactivité dynamique e.g. de biosurfaces accumulatrices de polluants, ou encore de divers systèmes colloïdaux issus d'activités anthropiques présents dans les écosystèmes aquatiques (e.g. les micro/nanoplastiques et leur vectorisation de polluants, les nanoparticules dendrimériques utilisées en 'drug-delivery' et leur adhésion sur les surfaces bactériennes). L'équipe PhySI s'est structurée autour d'une approche expérimentale et théorique ciblant les propriétés structurales, texturales, électrostatiques, nanomécaniques, hydrophile/hydrophobe, et les hétérogénéités chimiques/physiques de la matière colloïdale anthropique ou naturelle et de ses interactions avec les différents constituants biotiques et abiotiques des formations continentales superficielles. Parmi les problématiques actuellement étudiées par PhySI figurent : l'analyse des premiers stades d'adhésion bactérienne et de formation de biofilms bactériens ; l'évaluation aux échelles cellulaire et biointerfaciale des réponses biophysicochimiques de microorganismes à des stress générés par des contaminants nanoparticulaires ; la formalisation de la dynamique d'accumulation de contaminants par des systèmes cellulaires, en considérant les aspects thermodynamiques et cinétiques des transferts réactifs aux interfaces concernées ; la mesure et la modélisation (bio)physique de la réponse de biosenseurs bactériens et capteurs électrochimiques pour l'évaluation de la biodisponibilité de métaux en solution ; l'analyse multi-échelles (nm au cm) de la dégradation de masques FFP de protection individuelle utilisés pendant la pandémie et disséminés dans certains écosystèmes ; ou encore le développement d'approches statistiques par chimiométrie ou topologie pour l'analyse - sans à priori - de grands jeux de données issus d'expériences visant à une caractérisation de la réactivité de matrices colloïdales complexes (e.g. sols pollués).

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	ObservationS en milieu urbain
Nom(s) et prénom(s)	Jacob Jérémy, LSCE Thomas Thiebault, UMR Métis Régis Moilleron, Directeur du LEESU Ghassan CHEbbo, LEESU Romain Tramoy, resp. plateforme DATAPLAST, LEESU Anaëlle Simonneau, ISTO Vincent Rocher et Sabrina Guérin, Direction de l'Innovation, SIAAP Vincent Maréchal, Directeur de OBEPINE Fabien Palhol, Directeur de la Recherche et de l'Innovation, CEREMA
Adresse(s) mail	Jeremy.jacob@lsce.ipsl.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	X
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	

20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les milieux urbains sont des SIC singulières à plus d'un titre : elles sont densément peuplées, leur sous-sol est souvent très perturbé, elles sont le siège de flux de matières multiples, bien souvent d'origine anthropique, concentrées ou transformées. Les cycles de l'eau, du carbone et d'autres éléments/isotopes et la météo y sont bouleversés.

Ces dernières années, les milieux urbains ont été l'objet d'attentions multiples, comme relevé dans la dernière prospective SIC. Ils sont devenus un objet d'étude assumé de l'INSU, et de SIC en particulier. Mais au-delà de l'INSU et des SIC, le milieu urbain est aussi scruté par d'autres acteurs. Les questions sont transverses et multidisciplinaires. Par exemple sur les questions de santé (crise COVID), de santé environnementale, et plus généralement sur les relations avec les porteurs d'enjeux.

Si les SIC ont déployé des moyens d'observation organisés au sein du SNO Observil, en s'appuyant, entre-autres, sur les observatoires d'hydrologie urbaine (URBIS), d'autres réseaux/structures d'observation sont déployés. Au sein de l'INSU (ACTRIS, ICOS City...), au sein du CNRS (Zones Ateliers et Observatoires Hommes-Milieus), dans le domaine de la santé (OBEPINE/SUM'EAU...), de la biologie et de l'écologie, et bien évidemment des sciences humaines et sociales (sociologie, économie, sciences politiques, urbanisme... Gis Participation et Démocratie, Réseau recherche et praticiens : APERAU...), voire en dehors du domaine académique (Observatoire du SIAAP, [ODBU](#), [Observatoire de l'agriculture urbaine et de la biodiversité en Ile-de-France](#)...). Sans oublier des acteurs majeurs comme le CEREMA, impliqués à plus d'un titre, les acteurs locaux (APUR et agences d'urbanisme, GRECs) ou les partenaires privés qui sont à la fois fournisseurs et demandeurs de données et de connaissances sur les milieux urbains.

A ces structures qui ont la volonté de développer une observation pérenne du milieu urbain s'ajoutent des projets qui participent à l'effort sur des durées courtes (Projets ANR HUNIWERS, EGOUT, ARMAGEDDON...), ou intermédiaires ([PEPR VDBI](#)), et qui relèvent également de plusieurs disciplines.

Le paysage de la recherche et de l'observation en milieu urbain se complexifie. Il se structure selon des silos disciplinaires alors que les enjeux nécessitent des réponses systémiques et des efforts de lisibilité pour être intelligibles auprès des décideurs et opérationnels.

Et si nous profitons de la prospective SIC pour mettre tout le monde autour de la table ? Discuter des questions partagées, des mutualisations possibles (gestion des données et des échantillons), des solutions qu'une communauté peut, par ses approches, outils, méthodes, apporter aux autres, des verrous (scientifiques, techniques, réglementaires, organisationnels...) constatés, et des relations avec les opérationnels, décideurs, politiques et citoyens.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Rien de tout ce qui est listé, si ce n'est une relation forte aux territoires (urbains), bien entendu !

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- Dépasser les silos disciplinaires, organisationnels et institutionnels,
- Créer des liens fonctionnels entre les initiatives en cours et projeter l'ensemble sur le long terme,
- Améliorer notre visibilité et lisibilité auprès du grand public et des décideurs qui s'interrogent sur les liens entre les multiples initiatives en cours.

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- Du dialogue et un espace de discussion transdisciplinaire impliquant les pouvoirs publics et les citoyens (sous forme de collectifs, d'associations...),
- Un pilotage haut niveau (supra-établissements/organismes).

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

Réunion de l'ensemble des parties prenantes (scientifiques – EPST et EPIC, élus et agents – structure type France Urbaine ?, citoyens, partenaires privés...) à l'automne pour discuter :

- De nos objectifs à long terme (on parle d'observation...),
- Des points de convergence, des questions partagées ou la recherche de nouvelles questions permises uniquement par un croisement des disciplines et approches, par la confrontation des questions scientifiques et des préoccupations des gestionnaires,
- De l'exploitation à des fins scientifiques de données acquises par des organismes non-académiques (public/privé) dans le cadre, par exemple, d'un suivi réglementaire,
- Des contraintes légales/éthiques : par exemple sur la gestion d'échantillons qui n'est pas considérée de la même manière en sciences de la Terre et en santé/médecine, ou sur la propriété des échantillons et données,
- De la gestion des échantillons (conditions d'archivage, mise à disposition...) et des données, des conditions d'ouverture de ces dernières,
- Des économies d'échelle : par exemple des campagnes d'échantillonnage communes (dans le temps ou dans l'espace) qui permettent le croisement efficace de données,
- De la place de la recherche participative dans l'observation des milieux urbains,
- De nos relations avec les décideurs, collectivités, grand public – la manière de les aborder, les conditions de succès pour des relations durables,
- De la communication vers le grand public,
- Des questions contractuelles.

Cette réunion pourrait se tenir à l'occasion des Journées Scientifiques du PEPR VDBI les 16 et 17 octobre 2023, à la condition que l'ensemble des parties prenantes soit informé et invité.

Il s'agira de convenir d'une feuille de route et, éventuellement, d'une méta-structure (petite contribution au mille-feuilles...) pour développer de manière pérenne des interactions entre ces mondes.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Cinq défis sur les six sont concernés :

- Changement climatique

Adaptation de la ville au changement climatique/mitigation (eau, transports, verdissement, désimperméabilisation...)

- Inégalités éducatives

Plus largement les inégalités du territoire, sous l'ensemble de leurs aspects (physique, biologique, de santé, d'accès aux infrastructures, de vulnérabilités...).

- Intelligence artificielle

Data mining des données d'observation du milieu urbain et aide à la prise de décision

- Santé et environnement

Santé environnementale en contexte urbain, gestion des épidémies, pollution (air, eau, sol), liens avec la biodiversité, nouvelles pathologies...

- Territoires du futur

La ville : territoire du futur

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Ecohydrologie des milieux forestiers
Nom(s) et prénom(s)	Nolwenn Lesparre, Simon D. Carrière, Damien Jougnot, Benjamin Belfort, Sylvain Weill, Jean-Marc Limousin
Adresse(s) mail	lesparre@unistra.fr , simon.carriere@sorbonne-universite.fr , damien.jougnot@sorbonne-universite.fr , belfort@unistra.fr , s.weill@unistra.fr , jean-marc.limousin@cefe.cnrs.fr , nicolas.delpierre@universite-paris-saclay.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15- L'éco-hydrologie	X
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	X
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	X
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) : Modélisation des systèmes SIC	X

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Contexte : Etude du continuum sol-eau-plante-atmosphère. Interactions observations et modélisation

L'évapotranspiration (ET) constitue une composante clé du cycle hydrologique. La transpiration des plantes domine le terme ET dans de nombreux écosystèmes et en particulier dans les milieux forestiers qui contribuent à environ 60% de l'ET terrestre. Ce processus est donc un moteur important des transferts d'eau dans les sols et entre les sols et l'atmosphère. Les processus de prélèvement racinaire dans le milieu souterrain, le transport hydraulique dans les plantes et la transpiration foliaire vers l'atmosphère sont particulièrement difficiles à observer, à distinguer et donc à modéliser. Cette modélisation est pourtant cruciale dans le contexte du changement climatique, pour quantifier la répartition de la ressource en eau, entre drainage, écoulement et rétention dans les sols où l'eau reste disponible pour la croissance et la survie du couvert végétal. Les forêts occupent 30% des terres émergées à l'échelle globale et sont confrontées à une raréfaction globale de la ressource en eau disponible dans les sols, qui s'accompagne localement de phénomènes de dépérissement et mortalité. Les forêts sont souvent des milieux hétérogènes et complexes où il reste une grande marge de progression dans la compréhension des flux d'eau. Il existe aujourd'hui un réel besoin de nouveaux outils d'observations pour améliorer la compréhension des processus en jeu dans les interactions sol-eau-plante-atmosphère et leur représentation dans les modèles de fonctionnement des systèmes sol-plante-atmosphère.

Les approches de mesures classiques pour caractériser les processus mentionnés précédemment incluent les mesures de flux de sèves dans les troncs, des échanges gazeux entre la canopée et l'atmosphère (mesure d'Eddy covariance, de température de surface ou de bilan d'énergie), ou l'installation de capteurs dans le sol. Ces approches ont chacune des limites, soit parce qu'elles apportent des informations à portée locale, soit parce qu'elles ne permettent pas de distinguer l'évaporation physique de la transpiration des végétaux. Par ailleurs, il reste très difficile de quantifier les profils d'extraction d'eau dans les sols.

Des approches alternatives - issues principalement de la géophysique et de la géochimie - sont aujourd'hui appliquées sur le compartiment "végétation" pour mieux comprendre son fonctionnement hydrologique. On peut notamment mentionner pour la géophysique l'utilisation d'approches gravimétriques, de mesures par potentiel spontané ou de la tomographie électrique, et pour la géochimie, les approches isotopiques - basées sur les isotopes de l'eau, du bore ou du calcium. L'ensemble de ces techniques apportent des informations complémentaires. Il semble particulièrement pertinent de les combiner pour améliorer la caractérisation des processus et des interactions en jeu.

Enfin, nous soulignons la nécessité de développer des modèles adaptés à pour mieux comprendre les processus en jeu en éco-hydrologie forestières et les interactions entre ces processus. Ces modèles sont nourris par les observations et réciproquement les modèles nourrissent les observations dans le sens où ils permettent de vérifier l'interprétation des observations. Les recherches devront porter à la fois sur le développement de tels modèles et sur la manière dont ils peuvent être enrichis grâce à l'utilisation de nouvelles observations. Il

sera aussi primordial de mettre en avant l'importance d'un travail méthodologique sur la calibration et l'évaluation de la fiabilité de ces modèles.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Verrous scientifiques :

- Comment caractériser la dynamique des échanges hydriques aux interfaces des compartiments de la zone critique : eau souterraine - sol - végétation - atmosphère ?
- Comment localiser et suivre les prélèvements d'eau par les arbres dans les sols ?
- Comment modéliser les rétroactions entre les forêts et les ressources en eau dans un contexte de changement climatique ?
- Comment les modifications du forçage climatique vont-elles impacter cette dynamique des échanges hydriques ?
- Comment définir le "bon" degré de sophistication du modèle intégrant éventuellement des processus physiques (écoulement en milieux poreux, ...), chimiques (assimilation du CO₂, dégradation MO, ...), biologiques (photosynthèse, croissance, ...) ?
- S'agissant de processus dynamiques complexes, comment réaliser "efficacement" les changements d'échelles et relier les résultats des approches allant du local (profil) au global (bassin versant)?
- Comment transférer des résultats / outils construits - validés sur des observatoires bien instrumentés vers des sites non instrumentés ?

Verrous métrologiques :

- Quelle combinaison de mesures : directes, géophysique, géochimiques pour rendre compte de la dynamique des échanges hydriques ?
- Comment la compétition ou la solidarité entre les arbres pour la répartition de la ressource en eau affecte les observables ? (Différence entre mesures sur un arbre isolé et un arbre en forêt) ?
- Quelles sont les observables qui permettent de suivre des dynamiques distinctes d'un arbre à un autre ? En particulier dans les forêts pluri-spécifiques, les différences de stratégies physiologiques face au stress hydrique entre les espèces peuvent jouer un rôle crucial qui est peu décrit.
- Quelles stratégies d'échantillonnage (au niveau spatial et temporel) adopter et quels compromis consentir selon la connaissance du système et de ses processus clés ?
- Quid des évènements extrêmes et des éventuelles spécificités de monitoring ?

Verrous en termes de modélisation :

- Quels sont les processus majeurs à prendre en compte dans la modélisation de la dynamique des échanges hydriques ? Et comment représenter ces processus (approche conceptuelle, mécaniste...)
- Comment aborder puis critiquer le paramétrage du modèle (outils et méthodologies, selon les informations disponibles) ?
- Quelles sont les observables qui permettent de valider la fiabilité du modèle ?
- Comment quantifier l'influence de chaque arbre ? Comment représenter l'hétérogénéité de fonctionnement d'un arbre à un autre pour étudier comment un ensemble d'arbres arrive à dépasser des périodes de stress ?
- Comment intégrer les mesurables physiques et chimiques dans les modèles hydrologiques/écophysiologiques ?
- L'intégration des mesures géophysiques dans des modèles de transport de l'eau dans la plante permet-elle de déduire quels sont les paramètres cruciaux pour représenter de manière fiable les processus majeurs ?

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

Comme pour toutes les questions scientifiques aux interfaces disciplinaires (ici, sciences de la terre et sciences du vivant, mais aussi (géo)physique, (géo)chimie), il est nécessaire de former et recruter des chercheurs capables de porter des projets interdisciplinaires. Il faudra également former et recruter des techniciens et ingénieurs aux compétences multiples capables d'intervenir dans des projets interdisciplinaires.

Réaliser un état des lieux des pratiques / outils / méthodes existe-t-il tant au niveau opérationnel que R&D (==> le sujet est-il abordé dans les différentes communautés) ?

Nous aurons besoin de matériel spécifique dédié aux projets interdisciplinaires entre écologie forestière et hydrologie. Par exemple des résistivimètres¹ ou des spectromètres laser qui pourront être mobilisés sur des expérimentations d'observation de moyenne à longue durée.

Développement et maintenance de modèles à l'interface sol-plante-atmosphère capables d'intégrer les données issues de la géophysique, l'écologie fonctionnelle, l'écophysiologie,

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

La présente contribution se positionne clairement dans le contexte du premier défi sociétal défini par le CNRS : **Défi 1** : Changement climatique. En effet, l'écohydrologie des milieux

¹ Instrument géophysique permettant la réalisation de profils de résistivité électrique, propriété fortement influencée par la teneur du milieu. Un résistivimètre permet de suivre les variations de ces teneurs en eau au cours du temps, moyennant la calibration d'une relation de correspondance entre résistivité électrique et teneur en eau.

forestiers est à l'interface des cycles de l'eau et du carbone. Mieux les comprendre et quantifier leur dynamique permet de suivre leur évolution en regard du changement climatique actuel et notamment sur des sites bien étudiés des infrastructures de recherches telles qu'OZCAR/eLTER et ICOS.

Cette contribution rencontre nécessairement le Défi 4 "Santé et environnement" car nous avons besoin de comprendre comment vont évoluer les forêts qui rendent de nombreux services écosystémiques (dont la majorité reste encore inconnue ou mal comprise). Les changements climatiques vont contraindre les forêts à s'adapter, notamment pour mieux résister aux sécheresses de plus en plus fréquentes et intenses dans la plupart des zones climatiques. Une meilleure connaissance des transferts hydriques entre le sous-sol, la végétation et l'atmosphère permettra de mieux évaluer la ressource en eau disponible pour les forêts et de guider les décisions qui permettront d'anticiper les dépérissements et d'adapter la gestion forestière.

Cette contribution peut aussi être liée au **défi 5** "Territoires du futur", car il est de plus en plus question de rendre plus mixte les zones urbaines en y plantant des arbres pour lutter contre les îlots de chaleurs urbains (https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2023/08/25/ilots-de-chaleur-urbain-a-quoi-ce-phenomene-est-il-du-quelles-villes-sont-les-plus-touchees_6186542_4355770.html). Les développements méthodologiques sur les milieux forestiers pourraient, à terme être utilisés pour le suivi de l'écohydrologie urbaine.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Le rôle clé joué par les colloïdes naturels sur la dynamique et la trajectoire environnementale des contaminants.
Nom(s) et prénom(s)	MARSAC Rémi, BENEDETTI Marc, CATROUILLET Charlotte, SIVRY Yann, VAN HULLEBUSCH Eric, THARAUD Mickael
Adresse(s) mail	remi.marsac@cnrs.fr , benedetti@ipgp.fr , catrouillet@ipgp.fr , sivry@ipgp.fr , vanhullebusch@ipgp.fr , tharaud@ipgp.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	X
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

La prédiction du comportement et du devenir des **éléments traces métalliques (métaux comme Cr, Cu, Ce, Pt ; radionucléides comme U, Tc) et métalloïdes (comme As, Sb) (ETM)** dans les systèmes naturels reste un grand défi en raison de notre **incapacité à prédire leur spéciation**, c'est-à-dire leur distribution entre différentes espèces chimiques et physiques,¹ qui a été identifiée il y a des décennies comme un facteur clé de contrôle du transport, de la biodisponibilité et/ou toxicité.^{2,3} Par conséquent, **de nouvelles idées et un nouveau cadre conceptuel sont urgemment nécessaires pour mieux comprendre les paramètres moteurs de la dynamique et de la trajectoire environnementale des ETM, et fournir des outils prédictifs efficaces pour comprendre et prédire en profondeur leur comportement et leur devenir.**

Les processus à l'interface solide-liquide jouent un rôle clé dans les cycles biogéochimiques des éléments, que ce soit dû à des mécanismes de piégeage ou de mobilisation des ETM dans les eaux. L'adsorption des ETM sur les particules des sols ou des sédiments est un des principaux mécanismes de piégeage des ETM. A l'inverse, **les ETM ne sont pas seulement mobilisés par l'eau en tant qu'espèces dissoutes, mais sont aussi largement associés aux phases colloïdales.** Les colloïdes regroupent l'ensemble des objets de taille généralement comprise entre 1 nm à 1 µm qui ne sédimentent pas en l'absence d'agrégation. Les colloïdes sont omniprésents dans l'environnement et peuvent être transportés sur de grandes distances. Leur très petite taille leur confère une grande surface réactive. Le transport colloïdal est notamment l'un des principaux mécanismes expliquant le transfert d'éléments peu solubles (Fe, Al, Cu, Pu...) des sols vers les eaux, que ce soit dans les régions tropicales,⁴ tempérées⁵ ou subarctiques.⁶ Il est donc incontournable d'identifier les mécanismes de contrôle des interactions entre ETM et colloïdes naturels. **Cependant, la nature de ces interactions est mal connue à ce jour, et le développement de modèles géochimiques capables de prédire la spéciation des ETM reste un défi majeur.**

L'hétérogénéité et la petite taille des colloïdes limite très clairement la prédiction de leurs interactions avec les ETM. En effet, l'une des caractéristiques communes des systèmes naturels est la présence simultanée d'une grande variété de minéraux (comme les (oxy)hydroxydes de Fe/Al/Mn, les argiles, etc.) et de composés organiques (matière organique naturelle (MON)), qui peuvent potentiellement s'associer pour former des assemblages hétérogènes de taille colloïdale.^{4,6-11} Ces aspects (composition, taille, structure et morphologie) contrôlent à la fois la mobilité des colloïdes naturels dans l'environnement, mais aussi leur réactivité vis-à-vis des ETM.¹¹⁻¹⁸

Les colloïdes naturels sont produits sous l'influence de facteurs géochimiques, biologiques et hydrologiques (induisant des changements dans le débit d'eau, l'humidité dans les sols, la température, le pH, les conditions redox, la force ionique, etc.)^{4-7,19} et, directement ou indirectement, anthropiques tels que l'agriculture ou les activités menant au changement climatique (variations de température, inondations, etc.) et l'acidification du sol (due aux pluies acides, aux changements de végétation, etc.). Les grandes fluctuations ou gradients de pH et de potentiel redox (E_H) dans l'environnement, sous l'influence de ces facteurs bio/hydro/pédologiques et climatiques, ne permettent pas toujours l'établissement d'équilibres thermodynamiques, favorisant ainsi la formation de composés métastables. C'est notamment le cas des couples redox CO_2/C organique, $Fe(OH)_{3(s)}/Fe^{2+}$,

MnO_{2(s)}/Mn²⁺, dont les colloïdes sont constitués. **Le compartiment colloïdal est donc extrêmement dynamique de par sa composition ou structure**, mais cela n'est pas encore pris en compte dans les modèles géochimiques actuels.

Il est donc nécessaire de développer de nouvelles méthodologies expérimentales, des techniques d'échantillonnage et de préservation, des techniques analytiques et spectroscopiques, ainsi que des modèles numériques pour l'étude, la caractérisation et la prédiction des interactions entre ETM et colloïdes dans les systèmes naturels sous l'influence de divers facteurs bio/hydro/pédologiques et climatiques. Ces connaissances, approches expérimentales et outils de caractérisation et prédictifs doivent être acquis de toute urgence car le changement climatique ou d'autres activités humaines affecteront la production de colloïdes et, par conséquent, le cycle biogéochimique des ETM. Bien que ces processus se produisent à de très petites échelles, ils doivent être considérés dans des modèles conceptuels et numériques à plus grande échelle, pour mieux comprendre les paramètres moteurs de la diffusion des ETM et fournir un outil prédictif efficace pour bien comprendre et contraindre leur comportement et leur devenir.

Références

- (1) Nordberg, M.; Duffus, J.; Templeton, D. M. Glossary of Terms Used in Toxicokinetics (IUPAC Recommendations 2003). *Pure Appl. Chem.* **2004**, *76* (5), 1033–1082. <https://doi.org/10.1351/pac200476051033>.
- (2) van Hullebusch, E. D.; Lens, P. N. L.; Tabak, H. H. Developments in Bioremediation of Soils and Sediments Polluted with Metals and Radionuclides. 3. Influence of Chemical Speciation and Bioavailability on Contaminants Immobilization/Mobilization Bio-Processes. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* **2005**, *4* (3), 185–212. <https://doi.org/10.1007/s11157-005-2948-y>.
- (3) Worms, I.; Simon, D. F.; Hassler, C. S.; Wilkinson, K. J. Bioavailability of Trace Metals to Aquatic Microorganisms: Importance of Chemical, Biological and Physical Processes on Biouptake. *Biochimie* **2006**, *88* (11), 1721–1731. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2006.09.008>.
- (4) Allard, T.; Menguy, N.; Salomon, J.; Calligaro, T.; Weber, T.; Calas, G.; Benedetti, M. F. Revealing Forms of Iron in River-Borne Material from Major Tropical Rivers of the Amazon Basin (Brazil). *Geochim. Cosmochim. Acta* **2004**, *68* (14), 3079–3094. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.01.014>.
- (5) Neal, C.; Loftis, S.; Evans, C. D.; Reynolds, B.; Tipping, E.; Neal, M. Increasing Iron Concentrations in UK Upland Waters. *Aquat. Geochem.* **2008**, *14* (3), 263–288. <https://doi.org/10.1007/s10498-008-9036-1>.
- (6) Pokrovsky, O. S.; Dupré, B.; Schott, J. Fe–Al–Organic Colloids Control of Trace Elements in Peat Soil Solutions: Results of Ultrafiltration and Dialysis. *Aquat. Geochem.* **2005**, *11* (3), 241–278. <https://doi.org/10.1007/s10498-004-4765-2>.
- (7) Perret, D.; Gaillard, J.-F.; Dominik, J.; Atteia, O. The Diversity of Natural Hydrous Iron Oxides. *Environ. Sci. Technol.* **2000**, *34* (17), 3540–3546. <https://doi.org/10.1021/es0000089>.
- (8) Eusterhues, K.; Wagner, F. E.; Häusler, W.; Hanzlik, M.; Knicker, H.; Totsche, K. U.; Kögel-Knabner, I.; Schwertmann, U. Characterization of Ferrihydrite-Soil Organic Matter Coprecipitates by X-Ray Diffraction and Mössbauer Spectroscopy. *Environ. Sci. Technol.* **2008**, *42* (21), 7891–7897. <https://doi.org/10.1021/es800881w>.
- (9) King, S. M.; Jarvie, H. P. Exploring How Organic Matter Controls Structural Transformations in Natural Aquatic Nanocolloidal Dispersions. *Environ. Sci. Technol.* **2012**, *46* (13), 6959–6967. <https://doi.org/10.1021/es2034087>.

- (10) Solomon, D.; Lehmann, J.; Harden, J.; Wang, J.; Kinyangi, J.; Heymann, K.; Karunakaran, C.; Lu, Y.; Wirick, S.; Jacobsen, C. Micro- and Nano-Environments of Carbon Sequestration: Multi-Element STXM–NEXAFS Spectromicroscopy Assessment of Microbial Carbon and Mineral Associations. *Chem. Geol.* **2012**, *329*, 53–73. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.02.002>.
- (11) Guénet, H.; Davranche, M.; Vantelon, D.; Gigault, J.; Prévost, S.; Taché, O.; Jaksch, S.; Pédrot, M.; Dorcet, V.; Boutier, A.; Jestin, J. Characterization of Iron–Organic Matter Nano-Aggregate Networks through a Combination of SAXS/SANS and XAS Analyses: Impact on As Binding. *Environ. Sci. Nano* **2017**, *4* (4), 938–954. <https://doi.org/10.1039/C6EN00589F>.
- (12) Tipping, E. Humic Ion-Binding Model VI: An Improved Description of the Interactions of Protons and Metal Ions with Humic Substances. *Aquat. Geochem.* **1998**, *4* (1), 3–47. <https://doi.org/10.1023/A:1009627214459>.
- (13) Tournassat, C.; Ferrage, E.; Poinssignon, C.; Charlet, L. The Titration of Clay Minerals: II. Structure-Based Model and Implications for Clay Reactivity. *J. Colloid Interface Sci.* **2004**, *273* (1), 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.11.022>.
- (14) Koopal, L. K.; Saito, T.; Pinheiro, J. P.; Riemsdijk, W. H. van. Ion Binding to Natural Organic Matter: General Considerations and the NICA–Donnan Model. *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.* **2005**, *265* (1), 40–54. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.11.050>.
- (15) Hiemstra, T.; van Riemsdijk, W. H. Adsorption and Surface Oxidation of Fe(II) on Metal (Hydr)Oxides. *Geochim. Cosmochim. Acta* **2007**, *71* (24), 5913–5933. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.09.030>.
- (16) Bradbury, M. H.; Baeyens, B. Sorption Modelling on Illite. Part II: Actinide Sorption and Linear Free Energy Relationships. *Geochim. Cosmochim. Acta* **2009**, *73* (4), 1004–1013. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.11.016>.
- (17) Groenenberg, J. E.; Lofts, S. The Use of Assemblage Models to Describe Trace Element Partitioning, Speciation, and Fate: A Review. *Environ. Toxicol. Chem.* **2014**, *33* (10), 2181–2196. <https://doi.org/10.1002/etc.2642>.
- (18) Mikutta, R.; Lorenz, D.; Guggenberger, G.; Haumaier, L.; Freund, A. Properties and Reactivity of Fe–Organic Matter Associations Formed by Coprecipitation versus Adsorption: Clues from Arsenate Batch Adsorption. *Geochim. Cosmochim. Acta* **2014**, *144*, 258–276. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.08.026>.
- (19) Pokrovsky, O. S.; Manasypov, R. M.; Loiko, S. V.; Shirokova, L. S. Organic and Organo-Mineral Colloids in Discontinuous Permafrost Zone. *Geochim. Cosmochim. Acta* **2016**, *188*, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.05.035>.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Observons nos Observatoires
Nom(s) et prénom(s)	Simonneau Anaëlle, Rodriguez Fabrice, Gogo Sébastien, Jean-Sébastien Moquet
Adresse(s) mail	anaelle.simonneau@univ-orleans.fr , fabrice.rodriguez@univ-eiffel.fr , sebastien.gogo@univ-rennes.fr , jean-sebastien.moquet@univ-orleans.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	x
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	x
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Depuis plusieurs prospectives, la section SIC défend la mise en place et le maintien d'observatoires, considérés comme des laboratoires grandeur nature. Le dernier SNO en date, Observil, porte sur l'analyse des dynamiques et des échanges aux interfaces des milieux artificialisés. Inter et multidisciplinaire par définition, le suivi et l'analyse de ces « nouveaux » écosystèmes se réalisent à la limite des sections INSU et de l'INEE, mêlant SNO, ZA, IR OZCAR, avec des attentes qui leur sont parfois propres, parfois non, et qui rendent chronophages et énergivores des actions qui sont initialement menées volontairement par les équipes (implication dans divers comités organisationnels en plus du maintien d'acquisition des variables in situ par exemple). L'un des aspects qui pourrait être discuté lors de la prochaine prospective concerne une simplification de ces grilles de lecture qui aiderait certainement les communautés à co-construire des actions de recherche de plus grande envergure encore.

Des réflexions sont également à mener pour ces observatoires, sur : 1- le maintien et la pérennisation de nos sentinelles pour la construction de chroniques hautes fréquences des signaux géochimiques des objets instrumentés ; 2- les ressources à mobiliser pour y parvenir (financières et humaines notamment) ; et 3- les enjeux de préserver la recherche fondamentale menée au sein des observatoires (étude mécaniste et quantitative des phénomènes observés sur le terrain) tout en la valorisant auprès des gestionnaires locaux et des institutions afin de leur donner le recul nécessaire à l'amélioration des politiques publiques. Le dénominateur commun à ces observatoires est l'acquisition haute fréquence de variables d'intérêt permettant de mesurer la qualité des milieux. Maintenir cette phase de monitoring est précieuse mais prend tout son sens dès lors qu'elle est réalisée sur plusieurs années, voire décennies, notamment quand il s'agit de montrer des tendances ou des points de bascule. L'accès à des financements récurrents (ligne EC2CO spécifique ? financement spécifique à destination des OSUC ?) à la hauteur de l'ambition de ces suivis est indispensable, autant que le soutien humain qui doit leur être alloué. Actuellement, les financements attribués aux SNOs sont précieux pour faire fonctionner le système mais insuffisants pour amorcer des actions de recherche concrètes ou capitaliser les suivis mis en place. Sur le plan RH, force est de constater que la diversité des parcours et des compétences induit que de nombreux observatoires sont gérés de bout en bout par des enseignants-chercheurs et des chercheurs. La raréfaction des personnels techniques en soutien pour les activités de suivi et de mesures, et des postes CNAP, piliers de l'observation, fait contre sens au regard des ambitions annoncées par le CNRS. De la même façon, la gestion des données/échantillons, ainsi que leur bancarisation, constituent des enjeux de taille qui sont actuellement essentiellement gérés à l'échelle « individuelle et éphémère » des projets de recherche régionaux et nationaux portés par les équipes ; l'initiative portée par le SNO Observil est dans ce sens un effort important de mutualisation cohérente des données. L'ambition d'ouvrir nos observatoires vers des équipes nationales, voire internationales (eLTER), ne peut se réfléchir et se faire sans de réels renforts de nos institutions avec des ressources proportionnelles aux besoins.

La prospective constitue un espace de discussion essentiel autour du maintien des observatoires sur le long terme et des moyens à déployer pour y parvenir et pérenniser au-delà des actions, leur visibilité. Discuter des observatoires au-delà de leurs thématiques scientifiques propres permettra sans doute de les nourrir entre eux avec des retours d'expérience. De plus, ces discussions collectives pourraient également accompagner la création de nouveaux observatoires.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- Maintien des observatoires et de leurs activités sur le long terme
- Leviers d'action pour ce maintien : RH, financier, organisationnel, au-delà des sections « classiques » du CNRS pour sortir des réflexions par section à simplifier la mise en place d'actions transverses.

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- RH/métiers (en particulier support sur la question de la bancarisation des données)
- Moyens : lignes spécifiques pour les activités recherche et non uniquement pour la gestion organisationnelle des observatoires
- Pilotage « hors » sections disciplinaires pour aider à l'inter/trans-disciplinaire

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

- Inventaire et fonctionnement des observatoires existants hors champ disciplinaire
- Recensement des limites de fonctionnement (voir partie besoins) de chacun d'entre eux pour avancer dans une dynamique de groupe commune
- Dresser une liste des besoins communs et propres à chaque observatoire
- Identifier et discuter des leviers possibles

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Traiter les eaux usées de façon durable en minimisant les intrants et en maximisant les bénéfices socio-écosystémiques
Nom(s) et prénom(s)	Emilie E.L. MULLER & Stéphane VUILLEUMIER
Adresse(s) mail	Emilie.muller@unistra.fr ; vuilleumier@unistra.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	X
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	X
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	X
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	X
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	X
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	X
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	X
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Traiter les eaux usées de façon durable en minimisant les intrants et en maximisant les bénéfices socio-écosystémiques

Emilie E.L. MULLER, Stéphane VUILLEUMIER, pour la Fédération de Recherche en Environnement et Durabilité (FERED) de Strasbourg (<https://fered.unistra.fr>)

Les socio-écosystèmes sont confrontés à de nombreuses questions liées en particulier à la réutilisation et à la valorisation des déchets (économie circulaire), aux compromis entre efficacité du traitement des déchets et utilisation des ressources, au métabolisme urbain et aux micropolluants, etc. Pour relever les défis liés au fonctionnement des écosystèmes et à la santé humaine dans une perspective globale « OneHealth », le développement d'une approche renouvelée, intégrative et interdisciplinaire, basée sur le principe du « living lab » serait idéal. Cette approche permet de fortement développer le couplage de différentes disciplines et acteurs académiques et non-académiques. Nous proposons ici d'utiliser ce principe du « living lab » autour de la ressource en eau, et en particulier des stations d'épuration (STEP) au sein de leur territoire, pour une intégration renouvelée des STEP dans les socio-écosystèmes du XXI^e siècle.

Les défis sociétaux liés à la gestion durable de la ressource en eau dans le contexte d'un dérèglement climatique, avec des variations croissantes de magnitude et de fréquence des volumes d'eau à traiter (périodes de sécheresse et de précipitation intenses) couplées à la montée continue des températures, sont nombreux et étroitement interconnectés. Ils impliquent notamment des besoins accrus dans la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre (méthane et oxydes d'azote) et des rejets dans les écosystèmes en aval, en efficacité énergétique, dans la valorisation des ressources telles que les boues et les minéraux dans une perspective d'économie circulaire, et dans le traitement des micropolluants tels que les antibiotiques et les produits pharmaceutiques et cosmétiques.

Le développement de « living labs » interdisciplinaires et ouverts sur la société civile permettront de promouvoir une vision socio-écosystémique intégrée et renouvelée de la gestion de l'eau et du traitement des eaux usées, intégrant notamment de manière plus explicite les aspects du métabolisme urbain.

Les objectifs spécifiques identifiés à ce jour sont les suivants :

- des feuilles de route pour la transition des stations d'épuration vers un traitement plus efficace et durable de l'eau
- le développement de nouveaux indicateurs de fonctionnement des stations d'épuration et de suivi des intrants et des extrants
- la sensibilisation accrue des citoyens à la valeur de l'eau en tant que ressource.

Les équipes de recherche des différentes disciplines scientifiques associées aux SIC contribueront à définir les approches transdisciplinaires qui s'imposent pour cette thématique centrale et transversale. Celles-ci comprendront notamment, en amont, sur site et en aval des STEP :

- le développement d'approches intégrées pour la surveillance des polluants

- l'évaluation de la biodégradation microbienne et développement du traitement des micropolluants
- l'élaboration et l'évaluation de scénarios pour la gestion intégrée de la ressource en eau
- le développement d'approches de type science citoyenne pour accroître la sensibilisation à l'eau en tant que ressource clé pour le fonctionnement durable des socio-écosystèmes.

Un focus explicite sur la ressource en eau dans les socio-écosystèmes par le biais de « living labs » interdisciplinaires et décloisonnés apporteront visibilité et plus-value renouvelées aux recherches du domaine SIC. Par leur importance sociétale, ces travaux pourront bénéficier aux autorités locales, régionales et nationales, aux organismes de réglementation travaillant sur la gestion durable des ressources en eau, et plus généralement à tous les acteurs de la filière.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

1. Changement climatique : En tant que hot spot pour la réduction du carbone, de l'azote et du phosphate dissous dans les eaux usées avant de rejoindre un cours d'eau, les STEP peuvent être considérées comme un levier important dans la compréhension des cycles biogéochimiques élémentaires en lien avec le changement climatique.
2. Inégalités éducatives : Démonstrations et illustrations concrètes de l'apport de la démarche scientifique pour la ressource en eau comme thématique clé et transversale du quotidien des sociétés humaines.
3. Intelligence artificielle : l'utilisation d'IA pour traiter les informations et données générées est évidemment possible.
4. Santé et environnement : les STEP sont au cœur de la thématique santé et environnement (One Health, une seule santé). En effet, la collecte et l'épuration des eaux usées sert à la fois de filtre pour minimiser le déversement d'agent infectieux et de (micro)polluants dans l'environnement et de réceptacle pour mesurer le degré de contaminations des populations humaines et animales dont les eaux sont usées sont collectés (Observatoire épidémiologique dans les eaux usées - Obépine)

5. Territoires du futur : La production mondiale d'eaux usées est actuellement estimée à 360 milliards de m³ par an, dont 63 % sont collectés et 53 % traités (Jones et al. 2021). De fortes différences existent entre les territoires, entre autres en lien avec les moyens mais aussi les réglementations. La protection et l'assainissement de la ressource eau est l'un des sujets à traiter pour repenser l'habitabilité des territoires et garantir sa pérennité.
6. Transition énergétique : à la fois ressource et grande consommatrice d'énergie, une STEP est l'un des maillons clé de la transition énergétique.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Contribution de la prospective OA 2023
Nom(s) et prénom(s)	Claire Delon, pour la CSOA
Adresse(s) mail	Claire.delon@aero.obs-mip.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	x
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	x
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	x
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	x
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	x
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	x
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	x
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	x
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	x
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Au cours de la récente prospective INSU-OA, les interactions entre surfaces continentales et atmosphère en termes de flux de composés et d'énergie sont apparues comme des questions scientifiques majeures. Ce texte a pour objectif de présenter les défis de la prospective OA à la lumière de leur lien avec les SIC. Il s'avère que tous les défis identifiés dans OA mettent en avant l'importance du couplage avec la surface, d'un point de vue physique, chimique et biologique.

Défi « Variabilités, tendance et points de bascule du système climatique »

Parmi les questions scientifiques mentionnées dans ce défi (variabilité interne de l'océan, et dynamique océanique grande échelle), figurent les forçages du changement climatique qui dépendent de l'accumulation dans l'atmosphère des gaz à effet de serre et des espèces à courte durée de vie comme les aérosols. La compréhension et la modélisation fine des processus qui leurs sont associés permettra de prévoir leurs tendances et leurs impacts, y compris les mécanismes d'échange entre troposphère et stratosphère, et avec la zone critique. 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.

Une thématique nouvelle émerge pour quantifier de manière rigoureuse l'incertitude due à la calibration des paramètres de nos modèles climatiques concernant la physique des différentes composantes du système couplé océan-atmosphère-surface continentale-cryosphère.

Défi « Événements extrêmes : caractériser, comprendre et anticiper »

Parmi les verrous qui limitent actuellement notre capacité à caractériser, comprendre et prévoir les événements extrêmes météorologiques (vagues de chaleur atmosphérique, précipitations extrêmes, feux, éruptions volcaniques), figurent notamment les limites de notre compréhension physique des processus, notamment le rôle de la dynamique atmosphérique (e.g. blocages) et des surfaces continentales (e.g. nature et humidité du sol) dans les sécheresses, canicules et îlots de chaleur urbains.

L'observation in situ, spatiale, et aéroportée, ainsi que la modélisation offrent des opportunités de progrès indispensables pour caractériser la convection et les émissions par les feux et les éruptions volcaniques.

Défi « Convection atmosphérique »

La convection joue un rôle central dans la dynamique de l'atmosphère et du climat à toutes les échelles de temps : elle détermine en grande partie la distribution régionale des zones sèches et humides sur Terre, contribue aux transports verticaux et horizontaux à diverses échelles, joue un rôle actif dans la variabilité et la sensibilité du climat, et est la cause de très nombreux aléas. Les incertitudes sur les mécanismes fondamentaux de la convection affectent notre capacité à prévoir les événements météorologiques à fort impact tels que bourrasques, crues, foudre, cyclones tropicaux et tempêtes extratropicales, mais aussi la circulation générale de l'atmosphère et sa variabilité aux échelles saisonnières (moussons) et intra-saisonnières (oscillations de Madden-Julian). De plus,

nombre d'interrogations subsistent quant à l'évolution du cycle hydrologique et de ses extrêmes dans un climat qui se réchauffe. En définitive, c'est donc tout l'enjeu de l'adaptation au changement climatique qui s'invite dans le champ thématique de la convection atmosphérique.

Les enjeux de la paléo

Cinq grandes thématiques ont été identifiées, et s'inscrivent dans la continuité des inflexions des dernières années sur (1) le fonctionnement du climat, et de ses réponses à des forçages externes ou aux rétroactions internes, sont au cœur des activités OA ; (2) l'impact des processus géologiques internes et de surface, et de leurs rétroactions, sur le climat et les paléoenvironnements ; (3) les grands cycles biogéochimiques dont celui du carbone ; (4) l'évolution des écosystèmes et l'intégration de la complexité biologique ; (5) les interactions entre les humains et leur environnement.

Défi « Diversité du vivant et biogéochimie »

Aux interfaces continent/atmosphère/océan, les aérosols terrigènes émis par l'érosion éolienne des sols arides constituent des apports significatifs d'éléments, notamment de fer aux écosystèmes marins, accélérant voire déclenchant la production biologique. D'une manière générale, les aérosols agissent comme vecteur de transport de micro-organismes à longue distance. Dans le continuum (sol/mer)-plante-atmosphère, pour établir des bilans (saisonniers à annuels / locaux à régionaux) et mieux comprendre le cycle biogéochimique de l'azote, il est nécessaire d'étudier les processus dans les milieux : quelles sont les communautés microbiennes impliquées dans la nitrification et dénitrification ; comment ces communautés sont-elles sensibles aux changements de dépôt atmosphérique des composés azotés ; quelles sont les rétroactions des émissions vers l'atmosphère. Au-delà des composés d'origine naturelle, les matériaux issus de la combustion de biomasse (forêts et combustibles fossiles) peuvent perturber les écosystèmes par le dépôt d'aérosols, source de nutriments pour les micro-organismes, de contaminants ou de matières retenant les nutriments, comme le carbone suie.

Dans le futur, l'importance de la biologie dans les systèmes d'observation intégrés de l'océan, du littoral, jusqu'aux régions hauturières mais également dans la surveillance des masses d'air, des nuages et des flux de composés entre surfaces et atmosphère apparaît comme une nécessité pour une compréhension intégrée des processus. Ces nouvelles observations doivent apporter des informations précieuses pour l'étude de processus biogéochimiques majeurs. Ces derniers mettent en jeu les interactions biologiques pour l'évaluation des flux de composés aux interfaces, indicateurs du suivi de l'état de santé des écosystèmes.

Défi « Anthropisation des milieux & pollutions »

Des questions subsistent encore quant aux effets du mélange des masses d'air d'origine naturelle (biogénique, feux, volcans, poussières, etc) et anthropique, et sur la capacité de ce mélange à promouvoir, inhiber ou modifier la formation des polluants secondaires tels que l'ozone ou l'aérosol organique secondaire. Il est également nécessaire de mieux quantifier le dépôt sec des composés gazeux et particulaires, le vieillissement des aérosols, leur hygroscopicité et le dépôt humide.

Un axe important sera d'améliorer les paramétrisations de chimie aqueuse dans les nuages et sous les nuages pour une meilleure représentation du dépôt humide en combinaison avec des études expérimentales dédiées. Une piste serait de s'orienter plus vers des couplages de modèles biogéochimiques avec modèles de physico-chimie atmosphérique afin de mieux représenter les émissions et les dépôts en-ligne, et leurs impacts sur les écosystèmes.

Les multi- et transdisciplinarité OA/SIC et INSU/INEE/SHS/TS apparaissent comme une nécessité pour répondre aux enjeux sociétaux posés par les interactions climat / pollution / société / économie / vivant. Un rapprochement avec d'autres instituts comme INC (chimie théorique) ou INSB (biologie) serait souhaitable. Des rapprochements INSU-INEE sont à promouvoir, par exemple dans l'étude des cycles biogéochimiques des nutriments qui sont à l'origine des émissions par les surfaces continentales et océaniques, qui vont ensuite impacter la physico-chimie de l'atmosphère, ou l'impact du dépôt sur les écosystèmes.

Défi « Couplages et interactions d'échelles »

Les interfaces océan-atmosphère, surface continentale-atmosphère, cryosphère-atmosphère, cryosphère-océan ou encore plancher océanique - colonne d'eau océanique sont des zones d'échanges de différentes natures (chaleur, quantité de mouvement, eau douce, gaz, aérosols, apports en nutriments et éléments traces). Ces échanges se produisent sur une vaste gamme d'échelles spatio-temporelles qui interagissent entre elles. L'existence d'une suite (ou hiérarchie) de modèles numériques opérant à des résolutions spatiales plus ou moins fines et sur des domaines plus ou moins étendus est une opportunité pour mieux comprendre les couplages et les interactions d'échelles.

Aires prioritaires

Ces aires prioritaires, s'insèrent dans des collectifs dépassant la communauté océan-atmosphère.

Urbain

La recherche en OA sur le périmètre urbain est à l'interface avec d'autres disciplines académiques, avec des acteurs opérationnels et socio-économiques et en lien direct avec des problématiques sociétales fortes. Les questions traitées sont donc fortement interdisciplinaires et intersectorielles avec des implications directes sur la protection des populations face aux risques environnementaux et sur l'amélioration de la résilience et de la durabilité des villes. Cela implique d'être capable de considérer un continuum multi-échelle depuis l'échelle continentale ou régionale jusqu'à l'échelle de la rue, pour tenir compte de la grande diversité des composés chimiques présents dans le milieu urbain. A titre d'exemple, le nouveau service national d'observation OBSERVIL, labellisé par l'INSU-SIC en 2020 semble être une initiative importante qui pourrait permettre d'élargir son champ thématique (hydrologie urbaine, pollution des eaux...) aux observables OA.

Au-delà du couplage des modèles de météorologie et de qualité de l'air à l'échelle urbaine, on devra répondre à des questions croisées sur les effets de l'urbanisation, du changement climatique et des aménagements du territoire.

Zones tropicales et intertropicales

Documenter les cycles du carbone et de l'azote (stockage et transfert) nécessite de travailler aux interfaces, zones privilégiées des échanges entre surface et atmosphère. Les flux de matière et d'énergie aux interfaces et dans les écosystèmes restent encore peu étudiés en zone tropicale. Le cycle du carbone dans les forêts tropicales est ainsi imparfaitement connu, que ce soit dans le climat actuel ou à venir. De la même façon, les cycles du carbone et de l'azote dans les écosystèmes de savanes ou dans les agro-systèmes n'ont fait l'objet que de peu d'études en zone tropicale, en Afrique notamment. Une meilleure estimation des différents flux à l'échelle locale, régionale voire globale, doit intégrer différents types d'écosystèmes, pour étudier notamment (i) les impacts des pratiques agricoles, de l'élevage, et du dépôt de composés azotés, (ii) l'évolution des échanges de composés dans le contexte du changement climatique (augmentation de température, changement de régime pluviométrique, augmentation de la fréquence et intensité des extrêmes météorologiques), (iii) le stockage ou perte de carbone dans les fleuves, les réservoirs hydroélectriques, les zones côtières, les mangroves, les marais littoraux, les estuaires, les zones intertidales, (iv) les évolutions de ces flux de carbone et d'autres éléments (soufre et contaminants par exemple) sous une pression démographique en augmentation.

Il s'agit ici d'étudier l'homme en lien avec son environnement dans un contexte d'évolution rapide de celui-ci. Les démarches allieront des études d'impact, d'atténuation, d'adaptation, de préservation des ressources et d'exploitation soutenable du milieu.

Polaire

Les altérations environnementales des régions polaires (récepteurs de pollution, fonte du pergélisol et des calottes polaires, diminution du couvert nival et de la banquise arctique) affectent l'atmosphère, les surfaces continentales, l'océan, modifient le cycle du carbone, les cycles biogéochimiques et interagissent entre elles par nombre de rétroactions positives. Certains systèmes géophysiques présentent très vraisemblablement des points de basculement, les calottes polaires pouvant s'emballer et se retirer irrémédiablement sur de vastes régions pour un réchauffement global de plus de 2 degrés, élevant alors le niveau marin de plusieurs mètres en quelques siècles. Ces points de bascule peuvent interagir en cascade, le relargage d'eau douce issue d'un démantèlement des calottes pouvant affecter la circulation de retournement dans des proportions qu'il reste à préciser. Les altérations environnementales observées aujourd'hui dans les régions polaires sont bien les prémices de potentiels bouleversements climatiques majeurs aux conséquences globales.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Mécanismes moléculaires gouvernant la dynamique du carbone organique dans les SIC
Nom(s) et prénom(s)	Chassé Mathieu
Adresse(s) mail	mathieu.chasse@sorbonne-universite.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	x
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	x
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	x
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) : Dynamique de la matière organique dans les SIC	x

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

La matière organique détermine des propriétés fondamentales des sols¹. Sa décomposition contrôle leur fertilité en libérant les nutriments nécessaires à la croissance des plantes. Elle influence la structure du sol, favorisant la résistance à l'érosion et la rétention de l'eau dans le sol, et joue le rôle de filtre limitant la pollution des eaux. La matière organique du sol est aussi le plus grand stock de carbone terrestre. Avec des estimations autour de 3000 PgC, cela représente plus de trois fois le réservoir atmosphérique de carbone². De petites variations de ce stock peuvent ainsi mener à des changements considérables dans la concentration en CO₂ atmosphérique. Des études récentes montrent des pertes de carbone nettes depuis le sol vers l'atmosphère du fait du réchauffement³. Dans le même temps, maintenir voire accroître la quantité de carbone du sol peut contribuer à l'effort d'atténuation du changement climatique⁴. Sur le long terme, les prévisions d'évolution des stocks de carbone organique du sol sous l'effet du changement climatique, de l'évolution des pratiques agricoles, forestières et de l'occupation des sols restent incertaines^{5,6}. Une des limitations est le manque de contraintes sur la taille et le taux de décomposition des pools de carbone organique du sol persistant des échelles décennales à séculaires⁷.

Déterminer l'origine de la persistance du carbone organique sur le long terme est donc fondamental pour mieux contraindre la dynamique du carbone organique des sols. Conceptuellement, cela résulte de la combinaison de quatre mécanismes : (1) la récalcitrance chimique de macromolécules spécifiques ou de carbone pyrogénique qui sont difficiles à métaboliser⁸ ; (2) les interactions physico-chimiques créant une barrière énergétique à la décomposition par les micro-organismes, soit par complexation avec des ions ou bien par adsorption sur les surfaces minérales⁹ ; (3) la protection physique, résultant de la structure du sol, qui rend la matière organique inaccessible ou crée des micro-environnements défavorables à l'activité des micro-organismes¹⁰ ; (4) les régulations biologiques qui limitent le développement de communautés microbiennes comme dans les pergélisols ou les tourbières^{11,12}. Les modèles les plus récents prennent explicitement en compte de tels mécanismes supposés contrôler la dynamique du carbone organique du sol. Cependant, cette image conceptuelle est difficile à paramétrer et des données issues d'observations sont manquantes pour valider la nature précise et l'importance relative des processus supposés¹³. Prédire l'évolution des stocks de carbone organique du sol en utilisant des modèles mécanistiques peut pourtant aboutir à des incertitudes plus faibles que des modèles simplifiés, paramétrés sans considérer directement les mécanismes à l'origine de la persistance du carbone organique dans les sols¹⁴. Par ailleurs, un paramètre empirique clé pour estimer la capacité des sols stocker du carbone organique est le déficit de saturation, estimé à partir de la proportion de la fraction fine (< 20-50 μm) du sol et de la quantité de carbone qu'elle contient¹⁵. Ce concept résulte d'une vision conceptuelle impliquant une monocouche de matière organique recouvrant la surface des argiles au sens large et assurant sa protection¹⁶. Les études à l'échelle submicrométrique remettent en cause cette vision puisqu'elles montrent que la matière organique est associée de manière hétérogène aux surfaces minérales, en patchs sur lesquels la matière organique s'agrège^{17,18}. Le degré de persistance de ces patchs de matière organique comparé à celui de la matière organique en interaction directe avec les surfaces minérales reste néanmoins indéterminé.

Ces études pionnières cherchant à imager et caractériser la matière organique et ses interactions avec les autres composants du sol, notamment minéraux, devraient se

prolonger afin (1) de mieux prédire la dynamique du carbone organique du sol dans les modèles et (2) de mieux anticiper l'influence des pratiques et des modes d'occupation des sols. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser des échantillons adaptés, c'est à dire pour lesquels on sait qu'ils sont riches en carbone organique persistant (chronoséquence, expérience agronomique, caractérisation parallèle de la dynamique du carbone organique de l'échantillon). En parallèle, il est maintenant possible de s'appuyer sur l'expérience gagnée dans l'utilisation des techniques d'analyse à l'échelle submicrométrique¹⁹ telles que l'imagerie et la spectroscopie STXM (scanning transmission X-ray microscopy), les techniques de microscopie électronique en transmission (imagerie électronique, spectroscopie à dispersion d'énergie, diffraction des électrons, spectroscopie de perte d'énergie des électrons) ou la nanoSIMS (nanoscale secondary ion mass spectrometry), permettant une caractérisation chimique élémentaire, mais aussi isotopique ou fonctionnelle, à la fois de la matière organique et de la matière minérale associée. Un challenge clé est le développement de techniques de préparation des échantillons permettant de préserver la matière organique ainsi que les interactions existant *in situ* avec les minéraux du sol. Cette première étape doit permettre d'identifier des mécanismes précis (p. ex. adsorption sur des surfaces minérales spécifiques, complexation d'ions par la matière organique, fonctions chimiques récalcitrantes, texture protectrice). Une fois les mécanismes identifiés, un saut d'échelle est nécessaire pour estimer précisément leur rôle dans la dynamique du carbone organique des sols en identifiant des proxys adaptés, c'est-à-dire facilement et rapidement mesurables pour pouvoir étudier l'influence de ce mécanisme dans une large diversité de sols. Finalement, la validation de la pertinence de ces mécanismes doit être associée à un paramètre pertinent du sol pour les intégrer aux modèles de dynamique du carbone organique du sol.

1. Schmidt, M. W. I. *et al. Nature* **478**, 49–56 (2011).
2. Köchy, M., Hiederer, R. & Freibauer, A. *SOIL* **1**, 351–365 (2015).
3. Crowther, T. W. *et al. Nature* **540**, 104–108 (2016).
4. Bossio, D. A. *et al. Nat Sustain* **3**, 391–398 (2020).
5. van Gestel, N. *et al. Nature* **554**, E4–E5 (2018).
6. Garsia, A. *et al. Global Change Biology gcb*.16896 (2023).
7. He, Y. *et al. Science* **353**, 1419–1424 (2016).
8. Angst, G. *et al. Organic Geochemistry* **95**, 81–92 (2016).
9. von Lützow, M. *et al. European Journal of Soil Science* **57**, 426–445 (2006).
10. Balesdent, J., Chenu, C. & Balabane, M. *Soil and Tillage Research* **53**, 215–230 (2000).
11. Strauss, J. *et al. Earth-Science Reviews* **172**, 75–86 (2017).
12. Limpens, J. *et al. Biogeosciences* **5**, 1475–1491 (2008).
13. Luo, Y. *et al. Global Biogeochemical Cycles* **30**, 40–56 (2016).
14. Abramoff, R. Z. *et al. Improved global-scale predictions of soil carbon stocks with Millennium Version 2. Soil Biology and Biochemistry* **164**, 108466 (2022).
15. Georgiou, K. *et al. Nat Commun* **13**, 3797 (2022).
16. Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A. & Paustian, K. *Plant and Soil* **241**, 155–176 (2002).
17. Vogel, C. *et al. Nat Commun* **5**, 2947 (2014).
18. Mueller, C. W. *et al. Organic Geochemistry* **42**, 1476–1488 (2012).
19. Weng, Z. *et al. Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 1–22 (2021)

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- Développer des techniques de préparation d'échantillons permettant la préservation de la matière organique et de ses interactions avec les autres composants du sol.
- Mettre à profit et transposer les techniques d'imagerie et de caractérisation physico-chimique à l'échelle submicrométrique (STXM, MET, nanoSIMS) pour la caractérisation de la matière organique du sol et de ses interactions avec les autres composants du sol.
- Identifier des proxys facilement mesurables dans le sol par des techniques plus conventionnelles pour quantifier le rôle des mécanismes identifiés à l'échelle submicrométrique.
- Intégrer ces paramètres dans les modèles de dynamique du carbone organique des sols pour améliorer les prévisions d'évolution des stocks de carbone organique du sol avec le changement climatique et l'occupation des sols et les pratiques associées.

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Besoins de développement méthodologiques sur des équipements existants et donc du support technique associé (IT).

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

Dans l'ordre des verrous

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

En lien direct avec le défi n°1 : Changement climatique (comprendre le rôle potentiel des sols dans l'atténuation ou l'aggravation du changement climatique en fonction de la persistance du carbone organique dans le sol et de sa sensibilité aux changements climatiques à venir ou aux perturbations anthropiques sur les sols).

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Observatoire de la Zone Critique dans les TAAF
Nom(s) et prénom(s)	Gogo Sébastien, Armynot Eric, Bittebière Anne-Kristel, Chabaux François, De Vleeschouwer François, Jardé Emilie, Leroux Gaël, Verfaillie Deborah
Adresse(s) mail	sebastien.gogo@univ-rennes.fr , eric.armynot@univ-lille.fr anne-kristel.bittebiere@univ-lyon1.fr , fchabaux@unistra.fr fdevleeschouwer@cima.fcen.uba.ar , emilie.jarde@univ-rennes.fr , gael.leroux@cnr.fr verfaillie@cerege.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2- Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constante	X
3- Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4- Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5- Des outils aux données et aux connaissances	
6- La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7- Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9- Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10- Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11- Les contaminants de la Zone Critique	
12- Le continuum Homme/Terre/Mer	X
13- Le continuum biotique/abiotique	X
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15- L'éco-hydrologie	X
16- Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17- Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18- L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19- Les échelles de temps dans les SIC	X
20- L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21- Énergie et transition énergétique dans les SIC	
22- Autre thème ? (à préciser) : les systèmes polaires et sub-polaires	X

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Dans le cadre des projets de thèmes transverses financés par l'infrastructure de recherche (IR) OZCAR, un groupe de travail (qui va au-delà des contributeurs à cette fiche) s'est constitué pour discuter et réfléchir à la potentielle mise en place d'un observatoire de la zone critique dans les Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF). Cet observatoire s'inscrirait dans le continuum Terre-Mer, en cohérence avec les actions déjà menées dans la Zone Atelier Antarctique et Terres Australes (ZATA) et les projets financés par l'Institut Polaire Français Paul-Emile Victor (IPEV).

L'importance d'observer sur le long terme le fonctionnement de la zone critique dans le continuum Terre-Mer provient notamment du besoin de mieux comprendre les liens entre processus terrestres (e.g. fonctionnement des écosystèmes et des glaciers, érosion, hydrologie, pédologie), les processus océaniques et le climat. Ceci est d'autant plus crucial dans le sud de l'océan Indien où la rareté des surfaces continentales est à l'origine de phénomènes particuliers d'importance comme par exemple les blooms phytoplanctoniques en lien avec les îles et le plateau des Kerguelen. Compte-tenu de la diversité des compartiments et des processus en jeu, une approche interdisciplinaire dans le cadre conceptuel de la zone critique est pertinente et implique la quantification de différents flux entrant et sortant des zones émergées et la caractérisation et l'observation de la dynamique des différents compartiments composant la zone critique (glaciers, lacs, rivières, tourbières, enregistrements sédimentaires, sols et profils d'altération, végétations). De plus, l'importance stratégique de cette région du monde pour la France a été reconnue dans la stratégie polaire à horizon 2030¹. La mise en place d'un observatoire capable de faire le lien entre surfaces émergées et océan dans cette région répond pleinement aux objectifs stratégiques d'un point de vue scientifique et environnemental.

L'objectif de cet atelier prospectif est donc de discuter de la mise en place d'un observatoire de la zone critique dans les TAAF. Pour ce faire, le groupe se propose de recenser l'existant pour 1) identifier des questions scientifiques interdisciplinaires auxquelles seules des observations long-terme pourront répondre (pluri-décennale pour clairement identifier des tendances de fond indécélables sur le court terme), 2) identifier les manques potentiels en termes de mesures, 3) localiser des sites potentiels, 4) proposer une organisation (financement, coordination) de ces observations. L'isolement géographique et les conditions météorologiques des TAAF sont des composantes clés du projet puisqu'ils conditionnent en grande partie ce qu'il est possible ou pas de réaliser en termes d'accessibilité aux sites d'études et de mesures. Le groupe d'étude est pleinement conscient que le projet comprend de grands défis logistiques et météorologiques. Nos discussions actuelles et futures prennent et prendront en compte toutes ces difficultés qui sont au cœur de toute réflexion sur l'installation d'un observatoire long terme de la ZC dans les TAAF. Enfin, l'intérêt de mettre en place un observatoire sur le long terme réside non seulement dans le fait que les processus étudiés ont une temporalité qui dépasse très largement la durée de projets de recherche classiques et des campagnes d'été, mais qu'en plus les flux et les gradients étudiés subissent des changements environnementaux dont les effets s'inscrivent dans le long terme.

Cette réflexion est issue de plusieurs rencontres du groupe d'étude. Toutes les présentations seront à terme disponibles dans un espace partagé, ainsi que les comptes-rendus des réunions. Un document synthétisant les échanges va être rédigé. Une première proposition serait d'expérimenter un (ou des) site(s) pilote(s) sur l'archipel de Kerguelen pour tester la faisabilité d'un observatoire de la ZC avant de déployer sur les autres îles (Crozet, Amsterdam).

¹https://www.gouvernement.fr/upload/media/default/0001/01/2022_04_strategie_polaire_de_la_france_a_horizon_2030.pdf

Le groupe constitué lors de cet atelier de thème transverse OZCAR pourrait contribuer à l'exercice prospectif du CNRS 1) en diffusant auprès de la communauté SIC le contenu et les conclusions de nos différentes réunions, 2) en partageant le document final lorsqu'il sera écrit, 3) en participant aux discussions sur les thématiques de notre prospective : observations, continuum Terre-Mer, continuum biotique-abiotique, dynamique des flux de la zone critique, échelles de temps dans les SIC. Nous pourrions également participer à des discussions portant spécifiquement sur les zones polaires et subpolaires, zones de grande importance stratégique.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Le projet d'observatoire de la zone critique dans les TAAF intègre les sciences sociales dans les observables qui seraient mis en place (e.g. enquêtes régulières). L'objectif est de documenter et d'analyser l'évolution de la pratique de la recherche en milieux extrêmes.

Dans la mesure du possible (le critère de résistance aux intempéries étant primordial), les qualités écoenvironnementales des équipements (réparabilité, faible empreinte carbone) seront intégrées dans les critères de choix des cahiers des charges lors de l'acquisition des équipements. Le groupe pourrait aussi échanger sur l'impact carbone des recherches dans les zones australes et des moyens pour minimiser ces impacts (e.g. mutualisation des campagnes, du matériel, optimisation du temps sur place). Le groupe pourrait proposer une quantification de l'impact carbone (et/ou environnemental) de la mise en place d'un observatoire de la ZC dans les terres australes

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)

- Quantifier sur le long terme les échanges de nutriments (e.g. fer, azote, phosphore) entre l'océan Indien austral et les terres émergées (en l'occurrence l'archipel de Kerguelen) dans différents bassins versants,
- Documenter le cycle du carbone et de la matière organique (transfert terre-mer, en lien avec le PEPR FairCarboN)
- Comprendre les processus érosifs impliqués dans ces échanges de nutriments dans différents contextes : conditions climatiques, géologiques, pédologiques et biologiques contrastées,
- Caractériser les réponses des organismes vivants impliqués dans ces échanges aux variations environnementales,
- Documenter sur le long terme l'effet des changements environnementaux dans les sols, profils d'altération et les archives sédimentaires.

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

- RH ingénieur métrologie pour le suivi des stations sur le(s) site(s)
- Méthode/équipement innovant pour la mesure des débits dans des cours d'eau soumis à des variations de débit très importants
- Equipements de mesures de concentrations/flux des éléments/molécules d'intérêt (e.g. Fe, N, P, C), résistant à des conditions climatiques extrêmes

Ces besoins pourront bénéficier des retours d'expériences acquises à Amsterdam dans le cadre de Obs4Clim. Aussi, la mise en place des équipements pourraient se faire en coordination avec travaux réalisés dans le cadre du projet WISENET (ZATA, DT INSU) et bénéficier des apports du projet TERRA FORMA. Des membres de ces projets sont dans le groupe d'étude.

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

- 2023 – 2024 : Rédaction d'un document précisant la stratégie pour la mise en place d'un observatoire de la zone critique dans les TAAF
- 2024 – 2025 : Discussion avec les parties prenantes pour valider l'expérimentation dans un, voire deux site(s) pilote(s)
- 2026 – 2031 : Développement d'un, voire deux premier(s) site(s) pilote(s), avec le soutien de différents projets en cours et à venir,
- 2031 : Retour d'expérience sur la viabilité de l'observatoire,
- 2032 : Demande de labellisation en Service National d'Observation.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Le projet d'un observatoire de la zone critique dans les TAAF s'inscrit pleinement dans le défi sociétal portant sur les enjeux climatiques. Les observations sur le long terme qui seraient mises en place permettront de mieux comprendre le système Terre notamment dans une région du monde où il y a peu d'observatoires sur le continuum terre-mer.

Afin de coordonner les actions qui seraient réalisées dans la zone critique des TAAF avec les autres actions promues par le CNRS, le groupe est en relation avec les collègues des PEPR FairCarboN et BRIDGES, pour mettre en place des équipements et des protocoles cohérents entre toutes nos différentes activités. Des interactions avec d'autres projets structurants (e.g. GDR OMER, GDR Theoretical challenges for Climate Sciences, PPR TRACCS, PEPR OCEAN ET CLIMAT) pourraient être envisagées.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Valorisation biotechnologique des produits d'origine marine (aquaculture, alimentation, santé, cosmétique)
Nom(s) et prénom(s)	LEMAR
Adresse(s) mail	dir-umr6539@univ-brest.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	x
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	x
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	x
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	x
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	x
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Le continuum entre la recherche fondamentale et les applications de la recherche est fondamental à développer et soutenir.

La valorisation des organismes marins représente un enjeu sociétal majeur pour la production de nouvelles ressources alimentaires, mais aussi pour apporter de nouvelles molécules dans les domaines de la santé humaine, animale et végétale ainsi que dans le domaine des biomatériaux.

Approches biomimétiques et comparatives pour la santé

Les travaux en lien avec ces approches apportent des innovations de rupture qui répondent à des attentes économiques et sociétales fortes.

Les défenses chimiques comme sources exploitables d'ingrédients pour la santé et la cosmétique

Les défenses chimiques peuvent être étudiées par des approches d'écologie chimique et d'étude de réponses aux stress biotiques et abiotiques.

Solutions bio-inspirées pour lutter contre les pathogènes microbiens

Le développement de nouvelles stratégies pour lutter contre le développement microbien est un des enjeux socio-économiques majeurs pour les années à venir. Un objectif crucial est d'étudier les stratégies de défenses chimiques mises en œuvre par certains organismes marins pour interagir, réguler ou se prémunir des bactéries pathogènes et de leurs biofilms, dans la perspective de développer des solutions bio-inspirées, limitant l'utilisation d'antibiotiques et plus respectueuses de l'environnement.

Les molécules de défense des organismes contre les salissures

Un des freins majeurs à la mise sur le marché de molécules d'origine marine étant la difficulté de production de grandes quantités d'actifs, il est important d'étudier finement les stratégies de défenses naturelles d'organismes marins, cultivables ou présents en quantité exploitable et d'utiliser des approches biomimétiques afin de concevoir de nouvelles surfaces et formulations à activité antifouling et anti-corrosion.

Des lipides marins pour la nutrition animale et la santé

La spécificité et la chimiodiversité des lipides marins présentent des intérêts biotechnologiques dans les domaines de la nutrition humaine et animale et de la santé. La surexploitation des ressources marines et le besoin croissant en oméga-3 nécessitent de nouvelles sources d'approvisionnement durables. Deux approches peuvent être envisagées : la valorisation des co-produits de la pêche et la culture de micro-organismes marins riches en oméga-3.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Des lipides marins pour la nutrition animale et la santé

Approches biomimétiques et comparatives pour la santé

Les défenses chimiques comme sources exploitables d'ingrédients pour la santé et la cosmétique

Solutions bio-inspirées pour lutter contre les pathogènes microbiens

Les molécules de défense des organismes contre les salissures

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

La valorisation des organismes marins représente un enjeu sociétal majeur pour la production de nouvelles ressources alimentaires, mais aussi pour apporter de nouvelles molécules dans les domaines de la santé humaine, animale et végétale ainsi que dans le domaine des biomatériaux.

Cette contribution s'insère dans le défi sociétal 4) santé et environnement du CNRS

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Paléoclimats et paléoenvironnements des systèmes continentaux Néogènes et quaternaires d'Afrique et Paléogènes d'Europe
Nom(s) et prénom(s)	Johann Schnyder ; Loïc Segalen, Dominique Gommery
Adresse(s) mail	Johann.schnyder@sorbonne-universite.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	X
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	X
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	X
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	X
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	X
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	X
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	X
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) : Changements paléoclimatiques, paléoenvironnementaux pré-quaternaires et SIC : des leçons pour le futur ?	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Il nous paraît important **d'aborder les SIC sur le temps longs dans leur contexte paléoclimatique et paléoenvironnemental, quaternaire mais aussi pré-quaternaire**. Ainsi, de nombreuses données paléoclimatiques et paléoenvironnementales sont acquises par les équipes françaises et plus largement européennes sur les SIC en contexte pré-quaternaire. Ces données permettent de préciser, dans des fenêtres de temps précises, les contrôles environnementaux, notamment climatiques, sur les SIC, leurs liens avec les changements de paléoflore ou de paléofaunes, les échelles de temps (souvent longs) impliquées, etc....

Par exemple, nos équipes de Sorbonne Université (notamment Johann Schnyder et Dominique Gommery, Institut des Sciences de la Terre de Paris, IStEP, UMR 7193 et Centre de Recherche en Paléontologie-Paris, CR2P, UMR 7207, Paris-mais aussi d'autres collègues) et de l'Université de Rouen Normandie (Loïc Segalen, Morphodynamique continentale et côtière UMR6143 M2C) travaillent actuellement sur les systèmes Néogènes et quaternaires continentaux d'Afrique (Ouganda et Afrique du Sud) et Paléogènes en Europe, avec des approches sédimentaires, géochimiques et paléontologiques. **En Ouganda, ces recherches concernent notamment des systèmes volcano-sédimentaires : la dynamique climatique, et environnementale est donc partiellement contrôlée ici par un système volcanique, liant SIC et Terre Interne.**

D'autres collègues dans le paysage français travaillent sur des séries continentales pré-quaternaires, d'âge Cénozoïque, Mésozoïques ou Paléozoïque (Permien et Trias notamment pour les équipes françaises), en France, en Europe, ou hors Europe. Les domaines étudiés concernent à la fois des contextes paléoclimatiques tropicaux, tempérés ou de hautes latitudes, permettant d'approcher y compris dans des périodes anciennes, des changements climatiques et leur impact environnementaux dans des contextes géographiques variés.

-Quelles leçons peuvent nous apporter ces changements climatiques anciens sur le changement climatique actuel (et futur) ?

-Quelles(s) interactions/échanges pourraient être bénéfiques avec nos collègues de l'Actuel ?

-Comment fédérer plus notre communauté française et européenne pour produire des synthèses dépassant les exemples d'étude locaux ?

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Formation/Recherche au Sud

-Nos travaux en Ouganda et en Afrique du Sud s'appuient sur la formation de collègues locaux (ex. Sarah Musalizi, curatrice du Musée d'Histoire Naturelle à Kampala, actuellement finissant

sa thèse en Allemagne en Paléontologie en collaboration avec nos équipes ; projets (2023/2024) de formation d'étudiants africains en Afrique du Sud sur l'étude des paléokarst dans les environs de Prétoria, projets financés par les autorités régionales sud-africaines) et **peuvent donc tout à fait s'inscrire dans cette démarche de formation/Recherche au Sud.**

Responsabilité environnementale

Les études paléoclimatiques pré-Quaternaires sur les SIC peuvent aussi permettre **(1) de jeter un regard pertinent sur le changement climatique actuel et futur, et (2) de mieux comprendre et faire comprendre les évolutions climatiques du Système Terre au cours du temps**, que ces évolutions et contrôles soient d'origine naturelle ou anthropiques.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

***Quels verrous ?** Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

1-Changements d'échelle : passer de l'étude locale/régionale à la synthèse méta-regionale voire globale ;

2-Précisions des datations et des estimations de durée en contexte géologique pré-quaternaire continental

3-densité parfois faibles des études à l'échelle géographique, mais aussi **perte de compétence/connaissance possible à moyen terme dans certains domaines de terrain critiques** relativement délaissés depuis un certain temps en France/Europe : sédimentologie de faciès, paléontologie, palynologie/paléobotanique

***Quels besoins ?** (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

1-Favoriser les échanges sur les domaines paléoclimatiques entre les équipes à l'échelle française et européenne, permettant de faire émerger des synthèses ; encourager toujours les échanges entre les modélisateurs et les travaux de terrain. **Définir un grand projet synthétique impliquant ces différents acteurs**, qui pourrait être délivrable en quelques années ?

2-Organiser des réunions thématiques trans-disciplinaires sur le sujet des datations en contexte SIC, quaternaires et pré-quaternaires, pour faire le cas échéant émerger une stratégie **permettant de pousser le développement de moyens analytiques de datation français et européens, ou permettant de pousser une adaptation plus rapide de nos laboratoires aux dernières techniques d'analyse.**

3-Encourager ce type d'études pour améliorer leur densité. Encourager de nouveaux le recrutement de spécialistes dans des domaines de sédimentologie et de paléontologie de terrain (Systématique, paléoécologie), et notamment en palynologie/paléobotanique.

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

1-Favoriser les échanges sur les domaines paléoclimatiques entre les équipes à l'échelle française et européenne, permettant de faire émerger des synthèses ; encourager toujours les échanges entre les modélisateurs et les travaux de terrain. Définir un grand projet synthétique impliquant ces différents acteurs, qui pourrait être délivrable en quelques années ?

2-Organiser des réunions thématiques trans-disciplinaires sur le sujet des datations en contexte SIC, quaternaires et pré-quaternaires, pour faire émerger une stratégie permettant de pousser le développement de moyens analytiques de datation français et européens, ou permettant de pousser une adaptation plus rapide de nos laboratoires aux dernières techniques d'analyse.

3-Encourager ce type d'études pour améliorer leur densité. Encourager de nouveaux recrutements de spécialistes dans des domaines de sédimentologie et de paléontologie de terrain (Systématique, paléoécologie), et notamment en palynologie/paléobotanique.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Cette contribution s'inscrit tout à fait dans les défis sociétaux **1-Changements climatiques** et **2-Inégalités éducatives** listés par le CNRS.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Description et analyse de la biodiversité
Nom(s) et prénom(s)	LEMAR
Adresse(s) mail	dir-umr6539@univ-brest.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	X
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	X
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	X
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	X
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	X
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	X
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les populations et communautés au sein des écosystèmes, qu'elles soient benthiques ou pélagiques, animales ou végétales, intègrent dans leur structure et leur fonctionnement les effets du changement global. Il est essentiel de déconvoluer les effets des variations naturelles de ceux des pressions anthropiques, sur le maintien de la biodiversité et des fonctions écologiques (par ex. biogéochimie, flux de matière, ressources, recrutement, migration). La biodiversité des écosystèmes est ici entendue au sens large et s'exprime en termes taxinomique, génétique et fonctionnel, de l'échelle de l'espèce à celle des écosystèmes.

Aujourd'hui, il y a une nécessité de comprendre la variabilité spatiale et temporelle de la biodiversité, d'anticiper l'évolution des communautés marines et de la production primaire face à l'accroissement des pressions anthropiques, et de comprendre le lien entre cette variabilité et la variabilité spatio-temporelle des conditions environnementales.

Il s'agit de s'attacher à décrire la variabilité spatiale et temporelle de la biodiversité (benthique, pélagique, et microbienne) observée sur différentes interfaces (eaux côtières, estuaires, vasières, herbiers, estran rocheux, mangroves, récifs, fjords, plateau continental, continuum terre-mer) et sous toutes les latitudes.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) : *Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud*

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- Décrire/identifier de nouvelles espèces issues notamment de milieux encore peu explorés
- Décrire les patrons spatiaux et temporels de diversité intégrée au niveau spécifique, génétique, fonctionnelle ou écosystémique.
- Identifier les échelles pertinentes auxquelles les variations de la diversité renseignent sur les processus écologiques gouvernant la structure des communautés.
- Comprendre les mécanismes d'origine biotique ou abiotique entraînant des modifications de la structure des communautés.
- Prendre en compte les interactions chimiques (i.e. communication chimique) entre espèces dans la structuration des communautés
- Distinguer l'influence des facteurs d'origine anthropique et naturelle dans la structuration des communautés côtières
- Améliorer notre capacité à décrire la biodiversité et les habitats dans des écosystèmes variés, afin d'être en mesure d'identifier de nouveaux descripteurs de l'environnement pour statuer sur son fonctionnement et son "état de santé" sous l'effet de différentes variables forçantes.

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- Taxonomie moléculaire

- Campagnes de terrain dédiées à des sites peu connus et/ou peu accessibles (mutualisation de moyens)
- Mise en place de nouveaux sites d'observation
- Co-construction entre communauté en écologie/biologie et politiques publiques
- couplage d'approches observation terrain/spatial

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté)

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Cycles de vie et dynamiques de populations
Nom(s) et prénom(s)	LEMAR
Adresse(s) mail	dir-umr6539@univ-brest.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	X
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	X
5-Des outils aux données et aux connaissances	X
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	X
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	X
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	X
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	X
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	

21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les populations marines répondent aux conditions de leur habitat et à la fluctuation des ressources environnantes. Dans le contexte actuel de pressions environnementales multiples et croissantes, étudier l'effet des facteurs environnementaux sur le cycle de vie des organismes et la dynamique des populations qui en découle constitue une priorité de recherche.

Plus précisément, étudier les effets des changements spatio-temporels des conditions environnementales sur les différentes phases du cycle de vie des espèces marines et leurs conséquences sur la dynamique et la biogéographie des populations est important. Cela passe par une étude des performances de développement, de croissance, de reproduction et de survie à l'échelle individuelle et de la phénologie, des capacités de dispersion, de migration, de connectivité et de recrutement à l'échelle des populations.

Cette meilleure compréhension de la réponse des individus et des populations aux pressions actuelles permettra de proposer des outils de prédictions et d'envisager des solutions de conservation, de restauration ou d'usage durable des ressources marines.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- Décrire et quantifier les effets des contraintes environnementales naturelles et anthropiques sur les différentes phases du cycle de vie des espèces marines.
- Évaluer comment ces réponses au niveau individuel structurent les populations.
- Identifier et proposer des méthodes pour conserver et/ou restaurer les populations et mieux gérer leur exploitation.

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- taxonomie moléculaire
- bioénergétique
- biologging
- écophysiologie
- Couplage d'approches observation/modélisation

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux
(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Étude des transferts de matière et d'énergie au sein des populations, des communautés et des écosystèmes
Nom(s) et prénom(s)	LEMAR
Adresse(s) mail	dir-umr6539@univ-brest.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	X
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	X
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	X
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	X
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	X
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	X
11-Les contaminants de la Zone Critique	X
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	X
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	X
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	

20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les flux d'énergie, d'éléments et de leurs composés sont abordés à différents niveaux d'intégration du monde vivant : i.e. de l'individu vers la population, la communauté et l'écosystème. Il est crucial de décrire et comprendre comment les pressions environnementales, qu'elles soient biotiques, abiotiques, d'origine naturelle ou anthropique, influent sur les transferts de matière et d'énergie au sein des milieux pris à toutes les échelles citées ci-dessus. Les transferts de matière d'éléments majeurs (C, N, P, Si) ou mineurs (par ex. métaux traces, métaux lourds) entre le milieu marin et les organismes marins doivent être étudiés en fonction de la physiologie des organismes, de leur régime et écologie alimentaire, des activités de bioturbation, des interactions intra et interspécifiques et des conditions environnementales.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- A l'échelle individuelle : effet des contraintes environnementales sur l'allocation de l'énergie et des éléments entre la croissance somatique et la reproduction ;
- A l'échelle de la population : effet de ces mêmes contraintes sur différents « traits » (position trophique des organismes, natalité/mortalité, dispersion, etc.) et leurs conséquences sur les flux ;
- A l'échelle des communautés : rôle fonctionnel de la biodiversité sur les flux de matière et d'énergie dans différents systèmes benthiques ou pélagiques (bioturbation, prod primaire) ;
- A l'échelle des écosystèmes : interactions/rétroactions entre le fonctionnement de l'écosystème et, d'une part, les flux de matière aux échelles inférieures et, d'autre part, les conditions environnementales (paramétrisation de modèles d'écosystèmes)
- Quantifier les sources au sein des réseaux trophiques, et les sources/devenir de la matière organique aux différentes interfaces sédiment/eau/air

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- Méthodologie innovantes : Isotopie, imagerie...
- Mise en place d'observations avec une forte fréquence d'acquisition spatiale (drone, satellite) temporelle
- Mise en place de capteurs adaptés pour zones peu accessibles (low cost)
- Couplage observation/expérimentation/modélisation
- couplage terrain/spatial

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux
(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Flux aux interfaces
Nom(s) et prénom(s)	LEMAR UMR 6539
Adresse(s) mail	dir-umr6539@univ-brest.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	X
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	X
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	

20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

- L'atmosphère est une interface clé pour les cycles biogéochimiques des métaux à l'océan, en termes de limitation de la production primaire ou de toxicité en zone côtière.
- Les nombreuses campagnes du programme international GEOTRACES ont révélé l'importance des panaches hydrothermaux de métaux sur leur cycle global. Cependant, les processus responsables du maintien des métaux traces essentiels tels que le fer demeurent méconnus et nécessitent d'être explorés. De plus, l'impact de tels apports sur les budgets régionaux de Fe dissous et sur les cycles biogéochimiques des éléments biogènes (C, N, P, Si) restent encore à explorer.
- Les flux de Si entre les sédiments et la colonne d'eau, ceux entre la glace et la colonne d'eau ou entre le particulaire et le dissous sont en constante évolution avec des processus ou mécanismes liés entre autres aux différents organismes présents à ces interfaces.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- Quantification des sources (sources hydrothermales, apports atmosphériques ou sédimentaires), les puits et le devenir des éléments
- Connaissance de la spéciation des éléments aux interfaces
- Paramétrisation de certains processus dans les modèles de biogéochimie marine (disponibilités, échanges dissous/particulaires,...).
- Difficultés à acquérir des données de flux biogéochimiques à haute fréquence aux interfaces

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- Campagnes océanographiques dédiées
- Besoin de réactivité pour l'étude des "événements extrêmes" (atmosphère, volcans sous-marins)
- Co-construire certaines questions de recherche avec la communauté « Informatique / mathématique » afin de mieux appréhender la complexité nécessaire à la modélisation du lien entre la structure des écosystème et les flux biogéochimiques (vers la construction d'une nouvelle génération de modèles ?).

- Identifier des priorités dans les développements instrumentaux instrumentations (nouvelles techniques de prélèvement ou d'analyses)
- S'appuyer davantage sur les réseaux d'observation et contribuer à leur évolution.

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux
(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Contribution équipe Pollutions Environnement Santé Territoires (PEEnSTer), HydroSciences Montpellier
Nom(s) et prénom(s)	Casiot, Corinne ; Héry, Marina ; Resongles, Eléonore ; Bruneel, Odile et al.
Adresse(s) mail	corinne.casiot-marouani@umontpellier.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	X
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	X
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

La pollution est responsable d'environ 9 millions de décès par an, soit environ un décès sur six dans le monde ; ceux associés aux produits chimiques toxiques seraient probablement sous-estimés (Fuller et al., 2022). **Les contaminants inorganiques représentent une des menaces les plus sérieuses sur la qualité de la ressource en eau** en raison de leur toxicité et de leur persistance. Dans le contexte actuel de transition énergétique et numérique, des enjeux environnementaux et sanitaires nouveaux apparaissent, notamment à travers l'intensification de l'extraction minière des métaux « de base » (e.g Cu, Ni, Pb, Zn) et d'éléments dits « technologiques » (e.g. Ge, Li, In, Sb, Terres Rares,...) (Sovacool et al., 2020) et le développement d'une industrie informelle de recyclage de ces métaux dans les pays du Sud (Gottesfeld et al., 2018 ; Awasthi et al., 2016; Crépet, 2022).

L'extraction minière des métaux de base au niveau de gisements plus pauvres, de même que l'extraction d'éléments « technologiques » impliquent des exploitations à plus grande échelle ou sur de plus grandes profondeurs générant donc plus de déchets. Le déplacement de quantités énormes de matériaux modifie les circulations d'eau et mobilise des éléments inorganiques toxiques au sein de la zone critique, notamment via le vecteur eau, sur de vastes territoires. Limiter les risques pour la ressource en eau associés au renouveau minier Européen et à l'extraction des métaux de base et technologiques dans les pays du Sud constitue un enjeu majeur.

Par ailleurs, l'extraction et l'utilisation industrielle croissante des éléments dits « technologiques » génère une augmentation des flux au sein de la zone critique. Une meilleure compréhension du comportement de ces éléments dans l'environnement, des échanges entre les différents compartiments de la zone critique, et des interactions avec le vivant demeure essentiel.

La compréhension de la dynamique de ces contaminants inorganiques associés au renouveau minier et au recyclage, et la mise en place d'actions de mitigation de leurs impacts, nécessitent de nouvelles approches holistiques et transdisciplinaires. Ces approches doivent prendre en compte les changements globaux et intégrer les concepts d'exposome, de One Health, et d'ingénierie écologique.

Par ailleurs, le contexte de changement climatique doit être pris en compte dans notre façon d'appréhender les problématiques environnementales et sanitaires en lien avec l'extraction et l'utilisation des métaux. En effet, l'augmentation des extrêmes climatiques (sécheresses, évènements pluvieux extrêmes et de courte durée) modifie la dynamique spatio-temporelle de mobilisation et de transport des contaminants inorganiques. Un franchissement plus fréquent des limites de qualité des masses d'eau destinées aux différents usages est attendu, conduisant à une diminution des ressources utilisables. Les flux dissous (et particulaires) mobilisés dans les eaux souterraines et de surface en aval des sites miniers au cours des « hot-moments » sont peu documentés, les variations temporelles mal représentées via les modèles numériques. Les outils permettant de tracer les différentes sources de contaminants inorganiques à l'échelle du bassin versant doivent être combinés et de nouveaux traceurs développés afin d'augmenter leur pouvoir discriminant. Du fait de l'étroite connexion entre les particules et les micro-organismes qui leur sont associés, l'étude des communautés microbiennes a récemment été proposée comme outil alternatif pour tracer l'origine des sédiments (Zhang *et al.*, 2019). Ce type d'approche pourrait être appliqué au traçage de sources de contamination métallique dans les hydrosystèmes impactés par les activités minières, en complément d'approches de traçage géochimique (ex. traçage (multi-)isotopiques, spéciation...).

Les micro-organismes sont ubiquitaires dans les écosystèmes aquatiques et terrestres où ils jouent un rôle central dans les cycles biogéochimiques et les processus d'auto-épuration au sein de la zone

critique. En interagissant avec des contaminants métalliques (notamment via leur métabolisme ou système de détoxification), ils vont impacter la spéciation, le devenir et le transfert de ces derniers. Une meilleure compréhension des interactions complexes entre les communautés microbiennes et les polluants métalliques est essentielle pour la mise en œuvre de systèmes de remédiation durables («solutions basées sur la nature ») pour éliminer ou limiter les pollutions.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Les pays du Sud fournissent une immense part de la production minière (y compris pour de nombreux éléments technologiques) nécessaire à la consommation et à la transition des pays du Nord. Avec des normes environnementales moins contraignantes, ils subissent de graves impacts environnementaux et sanitaires. Ces impacts sont amenés à s'intensifier avec la croissance des besoins mondiaux en métaux. Il est donc essentiel que les recherches développées soient déclinées sur ces territoires et qu'elles contribuent à la formation d'étudiants des pays du Sud sur ces thèmes.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- Améliorer nos connaissances sur les flux des métaux « de base » et « technologiques » dans la zone critique, les tendances d'évolution, ainsi que leur comportement aux interfaces de la zone critique et leurs interactions avec le vivant. Malgré l'importance des microorganismes dans les cycles biogéochimiques, les mécanismes d'interactions avec certains métaux technologiques émergents sont assez mal documentés, (exemple de l'antimoine, pour lequel les connaissances sur l'absorption, l'efflux et les voies de transformation redox sont limitées (Deng et al. 2021)).
- Développer des approches multi-traceurs permettant d'identifier l'origine des contaminants inorganiques dans les hydrosystèmes continentaux : les techniques de traçage géochimique à elles-seules sont parfois faiblement discriminantes, en particulier dans le cas où plusieurs sources issues de minéralisations de composition élémentaire et isotopique proches contribuent à la pollution d'un cours d'eau. Poursuivre le développement de nouveaux traceurs isotopiques, en particulier les systèmes isotopiques des éléments « technologiques » (e.g. Li, Sb, Ge), et développer des approches de traçage multi-proxy (combinant par exemple microbiologie, approches multi-isotopes, spéciation aqueuse et solide, etc.).
- Comprendre, modéliser et prédire la variabilité spatio-temporelle, à différentes échelles, des constituants inorganiques dans les masses d'eau de surface et souterraines de régions minéralisées, exploitée ou non, à l'aide des méthodes de fouille de données et modélisation statistique par apprentissage automatique.
- Prendre en compte des effets du changement climatique sur la dynamique, le transfert et les impacts des pollutions métalliques. En particulier, une meilleure compréhension et modélisation de

la mobilisation des contaminants métalliques lors des évènements extrêmes (précipitations et crues) est requise.

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

RH/métiers :

Ingénieur de recherches en sciences de la donnée, bioinformatique, traitement statistique, pour les approches multi-traceurs

Modélisateur hydro-sédimento-géochimiste

Besoin RH pour aider à la mise en œuvre des approches de sciences participatives sur ces sujets.

Chercheur/chercheuse en modélisation par apprentissage automatique appliquée à la qualité de l'eau (constituants inorganiques)

Moyens :

Développer des Observatoires de la zone critique sur des territoires (post-)miniers et industriels, incluant les aspects sociaux et sanitaires pour l'observation, la modélisation, et la prédiction des tendances d'évolution à différentes échelles temporelles

Besoins méthodologiques :

Développement de méthodes et moyens pour le suivi d'évènement extrêmes (ex camion-labo ?, échantillonnage passif, capteurs low-cost et connectés, personnel ITA spécialiste de suivis hydro-sédimentaire et géochimiste ?).

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

Caractériser les mécanismes biotiques (dont communautés microbiennes, etc.) et abiotiques qui influencent la spéciation, le comportement et le devenir des métaux technologiques dans l'environnement. Etudier leur impact sur le vivant, à différentes échelles d'organisation biologique (de l'individu à la communauté). Combinaison d'observations sur le terrain et d'expériences en conditions contrôlées.

Développer et appliquer de nouveaux outils innovants et complémentaires, pour mieux identifier les sources de métaux dans les hydrosystèmes à l'échelle des bassins versants. Mise en place d'une combinaison de méthodes géochimiques (isotopes de métaux) et de méthodes basées sur l'ADN environnemental.

Traitement de données hydrochimiques de masse (big data) : application de techniques de fouille de données (data mining) et de modélisation statistique par apprentissage automatique (machine learning) pour 1) mieux comprendre et prédire la qualité des eaux et son évolution à toutes les échelles de temps et d'espace, sous contrainte de changement climatique et anthropique, et 2) améliorer l'évaluation du fond géochimique et de l'état de référence, outils précieux pour la définition des objectifs de qualité de l'eau à l'échelle de bassins versants miniers

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Défi 1. Changement climatique

Comprendre et anticiper les effets du changement climatique (augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements pluvieux extrêmes) sur la mobilisation des contaminants inorganiques dans les bassins versants miniers historiques (dans un contexte de renouveau minier).

Défi 4. Santé et environnement ?

Défi 6. Transition énergétique

Etudier et prévenir les impacts d'un renouveau minier sur la contamination de la zone critique en France et en Europe et des activités minières en cours dans les pays du Sud.

Références citées

Crépet, A. (2022, 12 juillet). « Produits électroniques : « la route du recyclage sera encore longue et coûteuse avant de pouvoir devenir rentable juste et efficace » (dossier : Tribune). *Le Monde*. Consulté le 13/09/2023. https://www.lemonde.fr/idees/article/2022/07/12/produits-electroniques-la-route-du-recyclage-sera-encore-longue-et-couteuse-avant-de-pouvoir-devenir-rentable-juste-et-efficace_6134466_3232.html

Fuller, R., Landrigan, P. J., Balakrishnan, K., Bathan, G., Bose-O'Reilly, S., Brauer, M., ... & Yan, C. (2022). Pollution and health: a progress update. *The Lancet Planetary Health*, 6(6), e535-e547

Gottesfeld, Perry, et al. "Soil contamination from lead battery manufacturing and recycling in seven African countries." *Environmental research* 161 (2018): 609-614.

Awasthi, A. K., Zeng, X., & Li, J. (2016). Environmental pollution of electronic waste recycling in India: A critical review. *Environmental pollution*, 211, 259-270.

Sovacool, B.K., Ali, S.H., Bazilian, M., Radley, B., Nemery, B., Okatz, J., Mulvaney, D., 2020. Sustainable minerals and metals for a low-carbon future. *Science* (1979) 367, 30–33.

Zhang, W. ; Gu, J., Li, Y. ; Lin, L. ; Wang, P. ; Wang, C. ; Qian, B. ; Wang, H. ; Niu, L. ; Wang, L. ; Zhang, H. ; Gao, Y. ; Zhu, M. ; Fang, S. New Insights into Sediment Transport in Interconnected River–Lake Systems Through Tracing Microorganisms. *Environ. Sci. Technol.* 2019, 53, 4099–4108.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Observation, dynamique des écosystèmes et transition socio-écologique
Nom(s) et prénom(s)	LEMAR
Adresse(s) mail	dir-umr6539@univ-brest.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	X
5-Des outils aux données et aux connaissances	X
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	X
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	X
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	X
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

La complexité s'accroît encore lors du passage de l'étude de l'écosystème à celle du socio-écosystème, notamment lorsque la dimension humaine est prise en compte non seulement en tant que forçage mais également dans les rétroactions des variations de l'environnement sur les activités humaines tout au long du continuum terre-mer. Il est particulièrement important de co-produire de nouveaux descripteurs de la complexité de ces socio-écosystèmes permettant de faciliter, grâce au renforcement de l'interdisciplinarité entre les sciences de la nature et de l'ingénierie et les sciences humaines et sociales. Un rapprochement très fort avec les acteurs des territoires et la mise en œuvre d'une co-gestion adaptative des socio-écosystèmes étudiés dans une perspective de durabilité sont également cruciaux (par ex. ODD 14).

Pour que cette complexité puisse être réellement intégrée à la décision en matière de soutenabilité, il nous faut tout d'abord être en mesure de mettre en œuvre l'analyse conjointe de séries d'observation qui diffèrent par leurs caractéristiques, notamment la fréquence, l'effort, et la répartition spatiale de l'échantillonnage, mais aussi, par les variables mesurées et l'espace-temps exploré. Cette approche n'est alors possible que dans un cadre où ces séries initiales sont d'abord utilisées pour décrire les trajectoires de chacun des systèmes étudiés et où l'analyse et la comparaison de ces dernières deviennent le point focal de l'étude.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- Une approche interdisciplinaire est indispensable, par exemple pour combiner de longues séries temporelles issues de la paléo-écologie et de l'archéologie, de séries d'observations à fortes résolutions spatiale et temporelle au moyen d'outils statistiques, acoustique, d'imagerie ou de télédétection, ou encore pour combiner l'analyse écologique d'un scénario de type pression-réponse avec des analyses plus sociales et économiques
- Traiter de la pertinence de ces développements au regard de la question de la durabilité implique également de passer de l'inter- à la transdisciplinarité en développant d'étroites interactions avec les différents acteurs des territoires étudiés. Ceci permet de co-construire des scénarios pour simuler les impacts du changement climatique et de l'anthropisation locale et pour mener des expérimentations socio-écologiques, telles qu'actuellement développées dans le réseau des zones ateliers. Ces expérimentations sont destinées à stimuler des changements de pratiques à terre comme en mer et à étudier leurs conséquences, tant sur l'environnement que sur les activités humaines.
- Développer/pérenniser les projets de sciences participatives (e.g. objectif plancton, phéno) permettant d'engager les citoyens et d'acquérir plus largement de nouvelles données d'observation.

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

- Formation de nouvelles formations et métiers à l'interdisciplinarité

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux
(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Plasticité phénotypique en réponse aux contaminants d'origine anthropique et aux microalgues toxiques : approche écotoxicologique
Nom(s) et prénom(s)	LEMAR
Adresse(s) mail	dir-umr6539@univ-brest.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	x
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	x
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	x
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	x
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	x
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	

19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	x
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les écosystèmes marins côtiers sont soumis à des pressions environnementales considérables du fait de leur exposition à de multiples contaminants chimiques et biologiques (par ex. pesticides, produits phytosanitaires et pharmaceutiques, débris plastiques, microalgues toxiques et phycotoxines), ainsi qu'aux modifications de l'environnement liées à l'augmentation de la démographie et au changement climatique (augmentation de la température, acidification, etc.). Soutenue par une demande sociétale forte, l'écotoxicologie doit être appréhendée dans un contexte de changement global qui est une priorité de recherche à laquelle sont associés d'importants enjeux réglementaires (Directive REACH, DCE, DCSMM, Grenelle de l'Environnement, COP, etc.).

Il est important d'étudier les effets d'exposition chronique à des contaminants présents à faible dose dans l'environnement marin sur la plasticité phénotypique et l'adaptabilité des organismes marins (phytoplancton, mollusques, poissons), dans des conditions expérimentales réalistes qui intègrent le plus possible la complexité du milieu (suivi de populations naturelles, caging in situ ou exposomes en milieu contrôlé). Les effets d'une grande variété de contaminants peuvent être évalués suite à des expositions mono- ou multi-stress : micro- et nanoplastiques, polluants émergents et perturbateurs endocriniens, tels que les résidus pharmaceutiques et polluants organiques persistants, micro-algues toxiques, effets cocktails et interactions avec d'autres facteurs abiotiques.

Concernant ce dernier point, la volonté d'intégrer la notion d'exposome, correspondant à l'ensemble des expositions environnementales auxquelles fait face un organisme tout au long de sa vie (contaminants chimiques mais aussi variations environnementales telles que l'acidification, le réchauffement de l'océan, la présence de pathogènes, etc.) constitue une approche transversale pour permettre une meilleure identification et gestion des dangers et des risques.

L'originalité est d'étudier les mécanismes d'action et les effets aux différentes échelles d'organisation du vivant, i.e. de la molécule à l'individu et à la population via notre expertise pluridisciplinaire aux différentes échelles (transcriptomique, protéomique, lipidomique, biochimique, cellulaire, histologique, écophysiologique, éthologique, modélisation). Il est de plus important de mener ces études sur différents stades de vie (embryons, larves, juvéniles, adultes) et tout au long du cycle de vie, avec la capacité de maintenir les cohortes d'une année sur l'autre afin d'évaluer les conséquences inter et/ou transgénérationnelles de l'exposition aux contaminants.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)

- Effets combinés des facteurs biotiques et abiotiques sur les performances physiologiques des organismes marins
- Rôle des stades précoces dans la capacité ultérieure des organismes à faire face aux contaminants dans un contexte de changement global
- Effets des contaminants au sens large sur les organismes marins et impact transgénérationnels
- Conséquences des effets des contaminants d'origine anthropique et aux microalgues toxiques au niveau individuel sur le devenir des populations et le fonctionnement général de l'écosystème

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

- Coupler des approches méthodologiques (expérimentation, observation, modélisation) et intégratives (moléculaire, cellulaire, tissulaire, individuel).
- Favoriser les interactions entre les physiologistes et les modélisateurs pour l'intégration de la capacité d'adaptation en tant que facteur clé dans les modèles prédictifs de l'effet des contaminants d'origine anthropique et aux microalgues toxiques sur les organismes.
- Nécessiter de sensibiliser et de former à ces couplages d'approches

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

- Intégrer les études multistress comme priorité
- Coupler les approches méthodologiques et intégratives
- Intégrer la capacité d'adaptation en tant que facteur clé dans les modèles prédictifs de l'effet du changement global sur les organismes.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

En développant la compréhension de la plasticité phénotypique des individus en réponse aux contaminants d'origine anthropique et aux microalgues toxiques dans un contexte de changements globaux et leurs conséquences à plus large échelle en proposant le couplage d'approches interdisciplinaires, cette contribution s'intègre dans les défis sociétaux (1) Changement climatique, et (4) santé et environnement du CNRS.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Equipe MOSAIC du LSCE
Nom(s) et prénom(s) (ordre alphabétique)	Bacour, C., Maignan, F., Ottlé, C., Salmon, E., Vuichard, N.
Adresse(s) mail	cedric.bacour@lsce.ipsl.fr , fabienne.maignan@lsce.ipsl.fr , catherine.ottle@lsce.ipsl.fr , elodie.salmon@lsce.ipsl.fr , nicolas.vuichard@lsce.ipsl.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	X
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les **modèles de surfaces continentales** permettent de représenter les échanges de matière et d'énergie avec l'atmosphère, de l'échelle locale à celle du globe. Ils sont un outil incontournable pour étudier les interactions et rétroactions entre la surface et l'atmosphère, notamment sous d'hypothétiques scénarios socio-économiques et climatiques futurs, ou pour comprendre les effets de changements environnementaux.

Alors que certains **écosystèmes** sont étudiés et échantillonnés depuis de longues années, d'autres sont moins bien connus : les **forêts tropicales sèches** par exemple restent peu étudiées alors que leur vulnérabilité aux changements climatiques et environnementaux est avérée. Certains écosystèmes et **hydrosystèmes** comme les **zones humides, les rivières et les lacs** qui contribuent de façon significative aux émissions de carbone et de méthane sont eux aussi mal cartographiés, échantillonnés et modélisés à l'échelle mondiale.

Dans la perspective de proposer et tester des solutions d'adaptation et d'atténuation des conséquences du réchauffement climatique, il apparaît essentiel de mieux représenter dans les modèles de climat, les **agrosystèmes mixtes** comme les systèmes agroforestiers ainsi que les **zones urbaines et périurbaines** qui concentrent les populations... Les processus **cryosphériques** hautement non linéaires sont eux aussi à améliorer pour mieux comprendre leurs interactions (par exemple neige-végétation-atmosphère) et prévoir leur évolution future face au réchauffement.

Pour étudier le rôle des surfaces continentales en termes de source/puits de CO₂ et pour quantifier l'impact sur le climat par modification du bilan radiatif, nous contribuons au développement de **configurations interactives du modèle de système Terre de l'IPSL** (Institut Pierre Simon Laplace) dans lesquelles ce sont les émissions d'origine anthropique (hors usage des terres) qui sont imposés comme conditions limites (« emission driven »). Ces configurations permettent ainsi de quantifier les **rétroactions climat-carbone**. Nous travaillons à un effort similaire afin d'obtenir une configuration interactive pour le CO₂ mais aussi le N₂O, et ainsi étudier les **rétroactions climat-CO₂-N₂O**. Les **interactions entre surfaces continentales et chimie atmosphérique** sont également étudiées pour des formes réactives de l'azote telle que l'ammoniac, par modélisation couplée.

Réduire les incertitudes sur la prédiction de la distribution spatiale et temporelle des puits et des sources de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄ et N₂O et principalement) repose en grande partie sur l'**amélioration de la paramétrisation** de ces modèles de surfaces continentales, à la fois par une description plus fine des **processus** physiques et biogéochimiques en jeu aux différentes échelles spatiales et temporelles, et par un **étalonnage des paramètres associés**.

Pour répondre à ce dernier point (étalonnage des paramètres), l'**assimilation de données** est devenue un outil numérique incontournable pour réduire les incertitudes des simulations des modèles de surface. La mise en œuvre de ces techniques numériques s'accompagne de défis conceptuels et techniques croissants à mesure que se complexifient ces modèles et

qu'augmentent le volume et le type de données (mesures *in situ*, produits satellitaires) pouvant être utilisés pour optimiser les modèles de surface.

A l'heure actuelle, les seules données pouvant être utilisées pour optimiser les **flux nets** de CO₂, CH₄, et N₂O (c'est à dire la répartition des puits et des sources) aux échelles régionales et mondiales sont des **concentrations atmosphériques** pouvant être mesurées *in situ* ou estimées à partir d'observations satellites. La condition *sine qua non* à l'exploitation de ces données de concentration est le **couplage des modèles de surfaces avec un modèle de chimie transport atmosphérique** afin de transformer les variations de flux simulés en concentration atmosphérique. La réalisation de ce couplage est techniquement complexe et sa mise en œuvre coûteuse en temps de calcul car cela nécessite la simulation des flux biosphériques à très large échelle spatiale (mondiale voire régionale). En outre, les approches d'assimilation variationnelle requièrent le calcul du gradient de la fonction coût à minimiser qui est fonction du Jacobien de chacun des deux types de modèles. Dans le cas de modèles de chimie transport atmosphériques, linéaires, son calcul est optimisé pour l'utilisation du modèle « adjoint » ou de fonctions de réponse précalculées. L'obtention du modèle adjoint (voire tangent linéaire) de modèles de surfaces continentales est en revanche beaucoup plus difficile. Dans le cas du modèle ORCHIDEE développé à l'IPSL, dont l'évolution est permanente et menée en parallèle par plusieurs personnes selon les processus implémentés, les travaux menés en ce sens depuis une dizaine d'années n'ont pas encore permis d'obtenir un outil consolidé de pré-traitement du code source afin d'en opérer la différentiation automatique. On a alors recours à des simplifications numériques pour calculer la matrice Jacobienne : par calcul en différences finies, très coûteuses en temps de calcul compte tenu du nombre important de paramètres que l'on cherche à optimiser.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

La modélisation des processus de surface requiert une approche interdisciplinaire du fait des interactions anthropiques et du besoin en observations multi-échelles pour les représenter. Cette approche doit associer géographes, hydrologues, climatologues, écologues, etc. La déclinaison de l'outil informatique lui-même nécessite la bonne coopération de métiers différents (e.g., ingénieur, numéricien).

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)

- Réponses aux **événements extrêmes** (inondations, sécheresses, feux, ...)
- Réponses des émissions de gaz à effet de serre liées aux **changements d'utilisation des sols**, e.g., changements de pratique agricole, préservation et restauration des zones humides, dégradation et déforestation, changements d'exploitation des forêts et expansion des forêts et des agglomérations.
- **Zones** arides à semi-arides, Hautes latitudes, Tropiques
- **Assimilation simultanée de données multi-sources** et en particulier les données de concentration atmosphérique en gaz à effet de serre (CO₂, CH₄ et N₂O) qui nécessitent 1) le couplage avec un modèle de chimie-transport, 2) le calcul « rapide » de la sensibilité des modèles continentaux aux paramètres optimisés à l'échelle mondiale (> obtention du modèle adjoint).
- **Virage GPU et IA** pour l'optimisation des temps de calcul (l'IA pouvant être utilisée pour remplacer la paramétrisation de certains processus coûteux en temps de calcul par des émulateurs, e.g., mise à l'équilibre du modèle) ou pour accélérer l'exploration de l'espace des paramètres pour la recherche d'optimums.

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

- Les moyens et outils numériques sont très accessibles et variés, cependant il est nécessaire de maintenir une expertise sur un nombre croissant de processus d'intérêt pour nos sociétés, portant sur un large éventail de disciplines. **Cet effort indispensable ne se traduit pas concrètement par une augmentation des ressources humaines, limitant ainsi les développements attendus des modèles.** De même les demandes en **ingénierie** de ne sont pas supportés par des **salaires attractifs** et la compétition avec le privé est inégale.
- Continuer à soutenir la recherche sur les **processus**.
- **Développement de systèmes d'assimilation de données offrant le couplage entre modèles de biosphère et modèles de chimie transport.** A l'heure actuelle, coexistent au LSCE deux systèmes d'assimilation de données adaptés à l'un et l'autre de ces modèles, mais pas aux deux en même temps. A terme, nous envisageons d'améliorer le Community Inversion Framework (CIF), capable d'utiliser un large éventail de données atmosphériques pour optimiser les flux de gaz à effet de serre à l'aide de différents modèles de chimie-transport atmosphérique, par un couplage avec des modèles de surfaces continentales (et en particulier le modèle ORCHIDEE). Ce travail nécessite une expertise à la fois sur les outils et méthodes d'assimilation ainsi que sur la modélisation,

l'objectif étant à terme d'exploiter au mieux les technologies de calcul intensif actuels ou à venir.

- **Données *in situ* pour des régions peu représentées** (Afrique, régions boréales, Amérique du Sud) dans les réseaux de mesures actuels (ICOS, FLUXNET, etc.), en dépit de leur vulnérabilité climatique, pour améliorer la représentation des processus biogéochimiques des écosystèmes correspondants.
- **Produits satellites et outils de traitement communautaires** pour résoudre les problèmes de mise à l'échelle modèles-observations.
- **Modèles hybrides** (physique et IA).

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

- Changement climatique
 - Estimation plus fiable du fonctionnement des écosystèmes terrestres faisant face au changement climatique en cours.
 - Estimation plus fiable de la distribution des puits et sources de gaz à effet de serre.
- Intelligence artificielle
 - Assimilation de données.
 - Paramétrisation de certains processus coûteux en temps de calcul par des émulateurs obtenus par des techniques de Machine Learning (e.g., mise à l'équilibre du modèle).
 - Meilleure exploitation des bases de données satellitaires.
 - Amélioration de la caractérisation des écosystèmes.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Plasticité phénotypique en réponse aux changements de conditions biotiques et abiotiques : réponses individuelles et conséquences sur l'écosystème
Nom(s) et prénom(s)	LEMAR
Adresse(s) mail	dir-umr6539@univ-brest.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	x
2- Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	x
3- Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4- Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5- Des outils aux données et aux connaissances	
6- La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7- Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	x
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9- Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	x
10- Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11- Les contaminants de la Zone Critique	
12- Le continuum Homme/Terre/Mer	
13- Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15- L'éco-hydrologie	
16- Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17- Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18- L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19- Les échelles de temps dans les SIC	
20- L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	x
21- Énergie et transition énergétique dans les SIC	
22- Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

L'un des principaux défis scientifiques actuels consiste à comprendre et à prévoir les réactions des écosystèmes marins au changement global afin de préserver la biodiversité et les services écosystémiques dont dépend la vie humaine. Ce défi implique une meilleure compréhension des processus fonctionnels de ces systèmes à différentes échelles d'organisation (réseau trophique, espèces, populations, organismes, tissus, cellules, molécules) et de temps (cycle de vie, jour, saisons, année, etc.) en réponse à la variabilité environnementale. L'objectif global est de développer des outils robustes qui informent les parties prenantes et les décideurs politiques, leur permettant de prendre des décisions en matière de politique environnementale. Il est donc nécessaire 1) d'acquérir des connaissances sur la capacité des organismes marins à faire face à des environnements changeants et 2) d'incorporer des mécanismes biologiques proximaux d'acclimatation et de réponse adaptative (microévolution et plasticité phénotypique) dans des modèles prédictifs reliant les scénarios climatiques à la distribution et à l'abondance des espèces.

Face à la variabilité environnementale, une espèce peut répondre par (1) un déplacement de sa distribution, (2) une acclimatation lorsqu'elle est exposée à des changements intermittents et rapides, ou (3) une adaptation, qui implique une sélection génétique au fil des générations.

L'acclimatation et la capacité d'adaptation à un environnement changeant sont des formes de réactivité environnementale résultant de la plasticité phénotypique, qui est définie comme la capacité d'un organisme à répondre à un facteur environnemental par un changement de forme, d'état, de mouvement ou de taux d'activité. La plasticité phénotypique est la capacité d'un génotype unique à produire plusieurs phénotypes alternatifs en réponse aux conditions environnementales. La plasticité peut être caractérisée à différents niveaux d'organisation, de l'échelle moléculaire à l'échelle sociale. Elle peut être continue ou discontinue, réversible ou irréversible, et adaptative, inadaptée ou neutre. Le degré d'adaptation ou de maladaptation de la plasticité dépend du fait que les phénotypes induits par l'environnement sont plus proches ou plus éloignés du nouvel optimum. Le concept de parcimonie de la sélection suggère que la plasticité devrait être adaptative en induisant un ou plusieurs phénotypes alternatifs représentant des stratégies d'optimisation de l'aptitude en réponse à un défi environnemental spécifique. Cependant, la plasticité adaptative est probablement le produit d'une sélection passée sur une variation qui peut avoir été initialement inadaptée. Il est donc difficile d'établir un cadre conceptuel permettant de prédire le rôle de la plasticité, qu'elle soit adaptative ou inadaptée, en réponse au changement global.

Le rôle de la plasticité phénotypique dans l'acclimatation et le potentiel d'adaptation d'un organisme au changement global ne sont actuellement pas pris en compte dans les modèles de prévision. La grande plasticité des organismes marins est principalement attribuée à leurs premiers stades, au cours desquels les fonctions morphologiques, structurelles et comportementales sont particulièrement sensibles aux contraintes environnementales. Cette plasticité développementale peut déterminer les performances physiologiques ultérieures, et peut également affecter la dynamique des populations et le fonctionnement des écosystèmes.

Les mécanismes qui sous-tendent les impacts de la plasticité phénotypique, au sein d'une même génération ou d'une génération à l'autre, ne sont pas bien connus et font encore l'objet de discussions. Il est clair que les études actuelles montrent que la contrainte pour tester les effets de la plasticité transgénérationnelle est de travailler sur des organismes à courte durée de vie, ce qui limite la diversité des espèces étudiées. D'autres études sont donc nécessaires pour mieux tester les effets transgénérationnels sur des organismes à longue durée de vie vivant dans des zones naturelles contrastées (tropicales ou tempérées, par exemple).

Pour établir le rôle des stades précoces dans la capacité ultérieure des organismes à faire face au changement global, il faut également disposer de connaissances complémentaires sur les effets simultanés de plusieurs facteurs biotiques et abiotiques variant en milieu naturels pour prévoir de

manière réaliste les réponses des organismes marins. Les réponses à de multiples facteurs de stress sont mal comprises bien qu'elles soient cruciales pour définir la capacité des organismes à s'adapter au changement climatique. Des analyses intégrées sont nécessaires, basées sur des facteurs de stress multiples agissant simultanément sur les organismes. Parmi les facteurs à considérer, les effets des paramètres physico-chimiques de l'environnement (principalement température, pH/pCO₂ et disponibilité en oxygène) et la disponibilité des ressources trophiques (quantité et qualité) doivent être étudiés de façon combinée ou isolée. Des changements de composition à la base du réseau trophique pourraient se répercuter dans les différents maillons de la chaîne trophique, en induisant une modification de la disponibilité de ces nutriments.

Pour avoir une vision intégrée de la plasticité phénotypique plusieurs échelles spatio-temporelles doivent être considérées : entre les différents stades de vie d'un individu (variabilité interindividuelle et norme de réaction), entre les populations, et enfin entre les générations. Elle doit aussi être étudiée à plusieurs niveaux d'organisation biologique, de la molécule (marques épigénétiques sur séquence d'ADN, expression de transcrits, protéomique, métabolomique et lipidomique), au phénotype de l'organisme entier, physiologique et comportemental, incluant l'étude des régulations hormonales (endocriniennes), des changements de bioénergétiques mitochondriales et des ajustements des grandes fonctions physiologiques, telles que les systèmes immunitaire, digestif, cardiovasculaire et reproducteur.

Enfin, comprendre et prévoir les réactions des écosystèmes marins au changement global repose sur l'acquisition de connaissances sur la capacité des individus à faire face à des environnements changeants, et nécessite la combinaison de trois approches méthodologiques : l'observation *in situ*, l'expérimentation et la modélisation, souvent mises en œuvre de manière découplée, parfois par manque de langage commun entre spécialités, de dialogue anticipé, ou en raison des problèmes de transfert d'échelles.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)

- Effets combinés des facteurs biotiques et abiotiques sur les performances physiologiques des organismes marins
- Rôle des stades précoces dans la capacité ultérieure des organismes à faire face au changement global
- Effets des changements globaux sur les organismes marins peuvent être atténués au fil des générations
- Conséquences des effets des changements globaux au niveau individuel sur le devenir des populations et le fonctionnement général de l'écosystème ?

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

- Coupler des approches méthodologiques (expérimentation, observation, modélisation) et intégratives (moléculaire, cellulaire, tissulaire, individuel).
- Favoriser les interactions entre les physiologistes et les modélisateurs pour l'intégration de la capacité d'adaptation en tant que facteur clé dans les modèles prédictifs de l'effet du changement global sur les organismes.

- Nécessiter de sensibiliser et de former à ces couplages d'approches

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

- Intégrer les études multistress comme priorité
- Coupler les approches méthodologiques et intégratives
- Intégrer la capacité d'adaptation en tant que facteur clé dans les modèles prédictifs de l'effet du changement global sur les organismes.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

En développant la compréhension de la plasticité phénotypique des individus en réponse aux changements globaux et leurs conséquences à plus large échelle en proposant le couplage d'approches interdisciplinaires, cette contribution s'intègre dans le défi sociétal (1) Changement climatique, du CNRS.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Dynamique et évolution des relations hôtes-micro-organismes
Nom(s) et prénom(s)	LEMAR UMR 6539
Adresse(s) mail	dir-umr6539@univ-brest.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	x
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	x
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	x
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	x
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	x
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	x
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	x
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	x
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	

21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Dynamique et évolution des relations hôtes-micro-organismes

La caractérisation des micro-organismes et de leur fonctionnement dans l'environnement et au sein des hôtes (microbiome, pathobiome, resistome), tels que mollusques, poissons, protistes, micro/macroalgues, est fondamentale afin d'identifier leur rôle dans les réponses physiologiques et l'état de santé des hôtes et de leur habitat. Les interactions complexes hôte/micro-organismes en lien étroit avec les changements environnementaux (réchauffement climatique, pollution, modification de la biodiversité environnante...) apparaissent jouer un rôle majeur dans la résilience des écosystèmes et peuvent être étudiées à l'aide d'approches moléculaires, cellulaires, fonctionnelles (pharmacologiques, RNA interférent), écotoxicologiques, écophysiologiques et génomiques.

Des études de diversité génétique et de phylogéographie des communautés microbiennes (procaryotes et eucaryotes) associées à une grande variété d'hôtes (par ex. poissons, bivalves, algues) ou de substrats / supports (par ex. micro-plastiques) et dans une grande variété d'environnements (estran, front Atlantique et environnements tropicaux et polaires) peuvent être aujourd'hui envisagées grâce à l'utilisation de séquençage environnemental à haut débit ('NGS'). Par ailleurs, des études plus spécifiques de comparaison de structuration des microbiotes à différentes périodes de l'année, ou associées à des populations sauvages versus d'élevages, ou à différents stades de vie (œufs, larves, juvéniles et adultes) ou dans des écosystèmes soumis à différentes pressions anthropiques devraient également être entreprises.

Santé et réponses physiologiques

Il est enfin important d'évaluer la santé et les réponses physiologiques, telles que les réponses immunitaires et métaboliques, via une approche intégrative, combinant des analyses biochimiques, cellulaires, génétiques et moléculaires. Ceci sera envisageable grâce au développement de nouvelles techniques pour approfondir les mécanismes d'interactions hôtes-microbiotes-pathogènes-environnement, comme le tri et la culture cellulaire, mais aussi des analyses d'images et des mesures phénotypiques cellulaires (*real-time* vidéo-imageur). De plus, il serait intéressant de rechercher si une mémoire immunitaire peut être transmise via les générations suivantes et d'étudier les mécanismes d'action des agents de priming grâce à des modèles de culture de cellules immunitaires de bivalves récemment mis en place au laboratoire. Enfin, il apparaît important d'explorer le rôle du microbiote sur la physiologie et la *fitness* de l'hôte afin de déterminer l'influence des stress environnementaux et/ou des composés xénobiotiques sur la diversité et l'activité du microbiote et sur le métabolisme et l'immunité de l'hôte, à la fois *in vivo* et *in vitro*. Ces résultats permettront de proposer des indicateurs microbiens de ces perturbations environnementales, de mieux appréhender le rôle des microbiotes dans la biotransformation des xénobiotiques, leurs biodisponibilités, ou bien encore la propagation des gènes de résistances aux antibiotiques dans l'environnement marin, mais aussi de décrypter le dialogue moléculaire avec les cellules immunitaires. Les cultures de cellules immunitaires feront l'objet d'analyses écotoxicologiques pour évaluer l'effet de polluants seuls ou en mélange, en exposition aiguë et chronique.

De récentes études ont montré l'importance fondamentale du microbiote sur la physiologie, la santé, la capacité d'acclimatation et la sensibilité des organismes marins aux agents pathogènes (par ex. vibrio), ainsi que sur la présence de bactéries résistantes aux antibiotiques (résistome).

Ces résultats soulèvent de nouvelles questions, comme par exemple, comment la diversité et/ou la fonctionnalité des microbiotes (d'un ou de plusieurs compartiments) pourraient-elles être associées aux capacités d'acclimatation des hôtes et représenter de nouveaux indicateurs de l'état de santé des populations de mollusques et/ou des écosystèmes qui les abritent ? L'émergence et la propagation de gènes de résistance aux antibiotiques associés aux organismes marins présentent-elles un risque en santé humaine dans une perspective "One Health" ?

Il est aussi important d'évaluer la virulence des micro-organismes et leurs interactions avec le microbiote des hôtes par des approches pluridisciplinaires. Une approche globale comme la génomique comparative, par séquençage global des génomes, des espèces/souches clés de parasites et de pathogènes présentant des degrés de virulence différents peut être envisagée. Des études plus fines ciblant spécifiquement certains facteurs clés de virulence identifiés (facteurs d'adhésion et d'invasion, systèmes de sécrétions, et systèmes toxines/anti-toxines) pourraient aussi être réalisées, afin d'étudier leurs fonctions, leurs cibles hôtes et leurs mécanismes d'action. Enfin, des approches de mutagenèse, de transcriptomique du pathogène au sein de son hôte au cours du processus infectieux sous différentes conditions environnementales sont aussi envisageables. Des analyses protéomiques comparatives entre différentes souches de vibrions ciblant le sécrétome ou encore des approches à l'échelle de la cellule unique liées aux interactions hôtes-pathogènes sont en cours de développement, afin d'étudier le rôle potentiel de l'hétérogénéité phénotypique dans la virulence de souches de vibrions doivent être aussi mises en œuvre.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

La recherche effectuée dans ce domaine permet d'alimenter les cours destinés aux étudiants du Master Sciences de la Mer et du Littoral (SML) de l'IUEM à l'UBO et le Master Microbiologie Fondamentale et Appliquée (MFA) coaccrédité par l'UBO et l'université de Rennes.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

*Développement de cultures cellulaires autres que cellules immunitaires (ex de bivalves)
Accès aux métagénomés des microbiotes en limitant l'impact du génome de l'hôte
Accès au transcriptome des microbiotes*

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

En lien avec les principaux verrous, des RH pour soutenir le développement de nouveaux modèles culturels de bivalves et d'analyses bioinformatiques des données de NGS environnementales

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>

, si adapté) :

Cette thématique s'insère dans deux des défis sociétaux du CNRS: Changement climatique ainsi que Santé et environnement.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Equipe MOSAIC du LSCE
Nom(s) et prénom(s)	Bacour, C., Maignan, F., Ottlé, C., Salmon, E., Vuichard, N.
Adresse(s) mail	cedric.bacour@lsce.ipsl.fr , fabienne.maignan@lsce.ipsl.fr , catherine.ottle@lsce.ipsl.fr , elodie.salmon@lsce.ipsl.fr , nicolas.vuichard@lsce.ipsl.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les **modèles de surfaces continentales** permettent de représenter les échanges de matière et d'énergie avec l'atmosphère, de l'échelle locale à celle du globe. Ils sont un outil incontournable pour étudier les interactions et rétroactions entre la surface et l'atmosphère, notamment sous d'hypothétiques scénarios socio-économiques et climatiques futurs, ou pour comprendre les effets de changements environnementaux.

Réduire les incertitudes sur la prédiction de la distribution spatiale et temporelle des puits et des sources de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 et N_2O et principalement) repose en grande partie sur l'**amélioration de la paramétrisation** de ces modèles de surfaces continentales, à la fois par une description plus fine des **processus** physiques et biogéochimiques en jeu aux différentes échelles spatiales et temporelles, et par un **étalonnage des paramètres associés**.

Pour répondre à ce dernier point (étalonnage des paramètres), l'**assimilation de données** est devenue un outil numérique incontournable pour réduire les incertitudes des simulations des modèles de surface. La mise en œuvre de ces techniques numériques s'accompagne de défis conceptuels et techniques croissants à mesure que se complexifient ces modèles et qu'augmentent le volume et le type de données (mesures *in situ*, produits satellitaires) pouvant être utilisés pour optimiser les modèles de surface.

A l'heure actuelle, les seules données pouvant être utilisées pour optimiser les **flux nets** de CO_2 , CH_4 , et N_2O (c'est à dire la répartition des puits et des sources) aux échelles régionales et mondiales sont des **concentrations atmosphériques** pouvant être mesurées *in situ* ou estimées à partir d'observations satellites. La condition *sine qua non* à l'exploitation de ces données de concentration est le **couplage des modèles de surfaces avec un modèle de chimie transport atmosphérique** afin de transformer les variations de flux simulés en concentration atmosphérique. La réalisation de ce couplage est techniquement complexe et sa mise en œuvre coûteuse en temps de calcul car cela nécessite la simulation des flux biosphériques à très large échelle spatiale (mondiale voire régionale). En outre, les approches d'assimilation variationnelle requièrent le calcul du gradient de la fonction coût à minimiser qui est fonction du Jacobien de chacun des deux types de modèles. Dans le cas de modèles de chimie transport atmosphériques, linéaires, son calcul est optimisé pour l'utilisation du modèle « adjoint » ou de fonctions de réponse précalculées. L'obtention du modèle adjoint (voire tangent linéaire) de modèles de surfaces continentales est en revanche beaucoup plus difficile. Dans le cas du modèle ORCHIDEE développé à l'IPSL, dont l'évolution est permanente et menée en parallèle par plusieurs personnes selon les processus implémentés, les travaux menés en ce sens depuis une dizaine d'années n'ont pas encore permis d'obtenir un outil consolidé de pré-traitement du code source afin d'en opérer la différentiation automatique. On a alors recours à des simplifications numériques pour calculer la matrice Jacobienne : par calcul en différences finies, très coûteuses en temps de calcul compte tenu du nombre important de paramètres que l'on cherche à optimiser.

Pour réduire le temps de calcul associé à la modélisation de certains processus, on tend de plus en plus à avoir recours à l'utilisation d'émulateurs, le plus souvent obtenus par la mise

en œuvre de techniques d'intelligence artificielle (IA) / Machine Learning (ML), et aux technologies de calcul intensif (GPU). L'utilisation de ces outils et de ces technologies nécessitent des expertises spécifiques, différentes de celles de la grande majorité des modélisateurs.

D'autres applications émergentes liées à la mise en œuvre de ces techniques basées sur l'IA/ML peuvent bénéficier à la caractérisation et compréhension du fonctionnement des surfaces continentales, comme par exemple pour le traitement (gap-filling) et l'analyse de données, ou l'intercomparaison de modèles et produits indépendants sur la base de leur réponse climatique (comme cela se développe en météorologie/climatologie pour l'analyse de champs 2D-3D).

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

La modélisation des processus de surface requiert une approche interdisciplinaire du fait des interactions anthropiques et du besoin en observations multi-échelles pour les représenter. Cette approche doit associer géographes, hydrologues, climatologues, écologues, etc. La déclinaison de l'outil informatique lui-même nécessite la bonne coopération de métiers différents (e.g., ingénieur, numéricien).

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- Couplage entre modèles de surfaces continentales et modèles de chimie-transport atmosphérique pour l'assimilation de données de concentration atmosphérique en gaz à effet de serre (CO₂, CH₄ et N₂O) pour contraindre la distribution des puits et sources aux échelles régionales et mondiale.
- Virage GPU et IA pour l'optimisation des temps de calcul (l'IA pouvant être utilisée pour remplacer la paramétrisation de certains processus coûteux en temps de calcul par des

émulateurs (e.g., mise à l'équilibre du modèle), pour l'interprétation des données, ou pour accélérer l'exploration de l'espace des paramètres pour la recherche d'optimums.

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

- Développement de systèmes d'assimilation de données offrant le couplage entre modèles de surfaces continentales et modèles de chimie-transport. Besoin d'expertises à la fois sur les outils et méthodes d'assimilation ainsi que sur la modélisation.
- Expertise en data science pour l'application de techniques IA/ML adaptées aux problèmes posés par la modélisation et le traitement/exploitation de données.

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

- Changement climatique
 - Estimation plus fiable du fonctionnement des écosystèmes terrestres faisant face au changement climatique en cours.
 - Estimation plus fiable de la distribution des puits et sources de gaz à effet de serre.
- Intelligence artificielle
 - Assimilation de données.
 - Paramétrisation de certains processus coûteux en temps de calcul par des émulateurs obtenus par des techniques de Machine Learning (e.g., mise à l'équilibre du modèle).
 - Meilleure exploitation des bases de données satellitaires.
 - Amélioration de la caractérisation des écosystèmes.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Continuum Terre-Mer (CTM) et interactions homme-environnement
Nom(s) et prénom(s)	LEMAR UMR 6539
Adresse(s) mail	dir-umr6539@univ-brest.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	X
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	

19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Le CTM est un système riche et complexe subissant fortement les pressions anthropiques, dans lequel s'opèrent d'importants transferts de matière et d'énergie. Ce système est composé de différents éléments (bassins versants, rivières, estuaires et zones côtières...) évoluant sur des échelles spatiales et temporelles différentes qui nécessitent d'être étudiés de manière intégrée. Au cœur de ce CTM, les estuaires sont le siège de processus biogéochimiques intenses (floculation, précipitation, complexation, minéralisation, adsorption/desorption, uptake/excretion...) qui modifient les flux et la qualité de la matière qui transite vers la zone côtière.

Transformation de la matière au sein des estuaires

Le milieu estuarien est complexe, siège d'une multiplicité de gradients (interface eau-sédiment, bouchon vaseux, stratifications halines...) et de multiples forçages dynamiques qui altèrent la position et l'intensité des gradients (e.g. marée, débits fluviaux). Des objectifs cruciaux auxquels nous devons répondre sont de mieux caractériser les processus biogéochimiques affectant les cycles élémentaires dans les estuaires. Différents types de composés doivent être considérés, dont les nutriments, la matière organique et les éléments métalliques. Les études doivent prendre en compte (1) la complexité spatio-temporelle en adaptant les stratégies de prélèvement, (2) les zones clés du système estuarien (e.g. compartiment benthique, zone du bouchon vaseux) et (3) le développement d'outils analytiques permettant d'accéder à différentes formes physico-chimiques (spéciation).

Approche intégrée et cascades d'impact de l'anthropisation et du changement climatique.

Dans un objectif de soutenabilité de la zone littorale (Future Earth), une approche intégrée du CTM est indispensable pour comprendre les cascades d'impacts se produisant dans ces systèmes et pouvant conduire par exemple à des contaminations, des eutrophisations ou à des modifications écologiques majeures. Cette approche est également nécessaire pour appréhender les rétroactions à plus long terme sur les activités humaines, en mer comme à terre. Si les bassins versants constituent généralement le siège des principales perturbations du continuum, il est important également de considérer les perturbations liées aux apports de matière depuis l'océan dont les échouages massifs de sargasses sur les côtes caribéennes sont un exemple. Les modèles intégrés du CTM peuvent être utilisés en mode prospectif pour des scénarios qui prennent en compte la composante climatique, qui devront la combiner avec des changements de pratiques, en particulier sur les bassins versants, pour étudier la cascade d'impacts du changement climatique et des activités humaines tout au long du continuum.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Cycles biogéochimiques N et P : des frontières planétaires à la transition écologique des systèmes alimentation/excrétion
Nom(s) et prénom(s)	Legrand Marine / Esculier Fabien
Adresse(s) mail	Marine.legrand@enpc.fr / fabien.esculier@enpc.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	1
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	2
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Synthèse - Cycles biogéochimiques N & P : une frontière planétaire dépassée, un problème systémique

Loin derrière le changement climatique en termes de médiatisation, mais loin devant en termes de franchissement des frontières planétaires, les cycles biogéochimiques de l'azote (N) et du phosphore (P) sont très largement perturbés au niveau global. Cette situation participe à remettre en question les conditions d'habitabilité, pour l'humain, de large portions des terres émergées.

En cause, un apport massif d'azote et phosphore réactif dans l'environnement. Extraits de réservoirs inertes (atmosphère pour le N, gisement fossiles pour le P), ils sont mis en circulation comme fertilisants pour les activités agricoles. Dans un contexte de fort découplage spatial entre activités de culture et d'élevage, les lisiers animaux constituent également une source de fuite de N et P dans l'environnement. Enfin, les systèmes d'assainissement actuels, dominés par le triptyque chasse d'eau, tout-à-l'égout, station d'épuration, ne permettent qu'un recyclage très partiel de ces éléments vers l'agriculture (ils sont en majorité « détruits » au prix d'une importante consommation d'énergie, ou relargués vers les milieux aquatiques).

Il en résulte un relargage important vers les milieux aquatiques (composés azotés et phosphorés solubles) et l'atmosphère (composés azotés volatils), conduisant à un ensemble de dégradations environnementales (surcharge en nitrate, eutrophisation des milieux aquatiques, marées vertes, zones mortes ; émissions atmosphériques de gaz à effets de serres et productions de composés toxiques).

Ces dégradations environnementales ont de graves conséquences en termes d'habitabilité, qui sont peu considérées encore dans leur dimension systémique :

- Eutrophisation conduisant à une destruction des milieux aquatiques (et donc de la biodiversité et des services écosystémiques associés)
- Pollution de l'eau aux nitrates conduisant à une perte de ressources en eau potable
- Pollution atmosphérique liée aux composés azotés

Au-delà de ces différents éléments et de façon transversale, cette question pose celle des conditions de maintien des grandes villes comme lieu de concentration d'une majorité de la population terrienne. Ces dernières sont en effet dépendantes de façon croissante :

- de circuits d'approvisionnement alimentaires internationaux (liés à des systèmes de production qui reposent sur des ressources N et P fossiles épuisables à moyen terme)
- d'infrastructures d'assainissement centralisées, très gourmandes en ressources fragilisées de façon croissante (eau, énergies fossiles, matériaux de construction, circuits numériques, etc.)

S'impose donc le déploiement plus large d'un champ de recherche inter et transdisciplinaire sur les enjeux liés aux cycles biogéochimiques N et P, et aux liens systémiques entre production alimentaire et gestion des excréments humains.

Ce champ de recherche peut s'appuyer sur les bases déjà développées par la recherche académique française et les acteurs du territoire impliqués sur le sujet¹. Il mérite de s'articuler avec la production de moyens de formation pour tous les publics et l'accompagnement d'une transformation des politiques publiques en la matière.

État des lieux détaillé : Fertilisation des cultures et gestion des excréments humains, deux mondes cloisonnés²

L'apport de nutriments aux sols agricoles

En France aujourd'hui, l'apport de nutriments aux sols agricoles sous forme d'engrais, est essentiellement linéaire et dépendante de ressources fossiles :

- les engrais azotés sont produits en usine à partir de l'azote gazeux contenu dans l'air. Cette synthèse chimique utilise usuellement le méthane comme réactif et comme source d'énergie. Ce procédé est consommateur de gaz fossile et fortement émissif en gaz à effet de serre (3 % de l'empreinte carbone de la France) ;
- les engrais phosphorés sont extraits de mines situées à l'étranger (notamment Tunisie et Maroc). Comme les combustibles fossiles et en l'absence de changement de pratique, cette ressource connaîtra, potentiellement dans un futur proche, un pic de production mondiale avant son épuisement. En outre, contrairement aux énergies fossiles qui peuvent être remplacées par des énergies renouvelables, le phosphore n'est pas substituable. Cette ressource stratégique est ainsi classée depuis 2014 comme matériau critique de l'approvisionnement de l'Union Européenne ;
- le potassium, ainsi que la majorité des autres macro- et micro-nutriments sont également extraits de mines fossiles.

Les productions agricoles sont principalement dédiées à l'alimentation humaine et les différents nutriments sont donc finalement ingérés par la population puis excrétés. L'alimentation et l'excrétion humaines présentent ainsi un potentiel quasiment total d'économie circulaire puisque les nutriments mobilisés par le corps sont intégralement excrétés par la suite. Ainsi, un Français ingère en moyenne 5 kg d'azote et 500 g de phosphore par an : on les retrouve majoritairement dans les urines (à hauteur de 4 kg d'azote et 300 g de phosphore) et de façon secondaire dans les matières fécales (1 kg d'azote et 200 g de phosphore).

La gestion des excréments humains et des nutriments qu'ils contiennent

En milieu urbain, les urines et matières fécales, de très faible volume, sont usuellement diluées en égout dans les 150 litres d'eaux usées rejetées chaque jour par chaque habitant. La nécessaire exigence de protection des milieux aquatiques a entraîné la construction d'usines devant extraire ou détruire la majeure partie des éléments présents dans les eaux usées avant le rejet des eaux épurées au milieu naturel. Les contraintes de ce type de traitement imposent des solutions coûteuses en équipement, en réactifs et en énergie. En outre, la valorisation des nutriments présents dans les eaux usées est peu efficace et complexe.

¹ Voir en particulier le programme OCAP (Organisation des Cycles Carbone, Azote, Phosphore dans les territoires), programme de recherche/action sur la transition écologique des systèmes alimentation/excrétion et la gestion des excréments humains, initié en 2014. www.leesu.fr/ocapi

² Reprise du document suivant : [Propositions pour une économie circulaire des nutriments : vers une transition écologique de l'assainissement](#). Esculier, F. 2018.

Pour les petites agglomérations, ces nutriments sont en grande partie rejetés dans les milieux aquatiques : cela ne permet pas leur recyclage pour les activités humaines et dégrade les milieux aquatiques par l'eutrophisation. Pour les grandes agglomérations situées en zone considérée comme sensible à l'eutrophisation :

- l'azote, naturellement présent dans nos urines sous une forme minérale assimilable par les plantes, subit l'opposé d'une valorisation : il est dissocié en azote gazeux par des procédés lourds et consommateurs d'énergie et de réactifs. Le taux de recyclage de l'azote des excréments humains, par l'épandage des boues, est d'environ 5 % en moyenne en France ;

- le phosphore est souvent précipité par adjonction de réactifs métalliques. Sa valorisation agricole n'est que partiellement effective (30 % de recyclage en moyenne française) et elle est pénalisée par la composition des boues présentant de nombreux autres éléments parfois incompatibles avec cette valorisation (métaux, organohalogénés, etc.)

Cet état de fait est le fruit d'un long processus de linéarisation de notre économie qui a créé la notion de déchet, dévalorisé nos déjections et découplé villes et campagnes, en exportant le plus loin possible ces déjections dans une logique unique de salubrité, au détriment de la circularité.

Entre recherche et projets pilotes : une dynamique émergente en France

Face à ce constat, de nombreuses initiatives sont récemment apparues à travers le monde afin de réaliser un « assainissement écologique ». La majorité d'entre elles repose sur le même principe que pour la gestion des déchets solides : la séparation à la source. Le tri sélectif peut ne porter que sur les urines car elles contiennent la majorité des nutriments excrétés par le corps humain. Leur collecte se fait alors usuellement à sec, ou avec très peu d'eau, avec des traitements éventuellement très légers (simple stockage), ou plus complexes selon les situations locales, et usuellement décentralisés. Elles permettent alors une gestion à la fois salubre et circulaire de nos déjections.

Ces initiatives sont développées à l'étranger dans tous les types de pays et d'habitat depuis plus de vingt ans. Certains procédés sont encore expérimentaux mais beaucoup de systèmes ont déjà fait leur preuve sur plusieurs années. Malgré son expertise reconnue dans l'assainissement, la France est restée largement à l'écart de ces initiatives jusqu'en 2015. La majorité des initiatives françaises étaient citoyennes et cantonnées au milieu rural ou à l'événementiel (toilettes sèches de particuliers ou de festivals).

Si plusieurs projets de recherche académique et quelques réalisations voient actuellement le jour, le potentiel de la séparation à la source semble encore sous-investi.

Dans une optique d'évolution globale du système alimentation/excrétion français, une transition écologique des systèmes de production agricole et du régime alimentaire, actuellement non soutenables, serait également à prévoir.

Comme certains de nos pays voisins, il paraît judicieux de développer **une politique publique intégrée de l'azote et du phosphore**, afin de mieux faire ressortir que les pollutions d'aujourd'hui, agricoles ou urbaines, ne sont que le fruit d'un malentendu lié à une gestion déficiente de ce qui était hier des ressources... et dont on peut souhaiter qu'elles le redeviennent demain.

Celle-ci doit s'appuyer sur un **déploiement plus large de la dynamique de recherche interdisciplinaire** déjà amorcée depuis une dizaine d'années, notamment par le programme OCAP,

dans le sillage des travaux préalables menés à l'international sur les cycles N & P, l'eutrophisation et ses conséquences, les systèmes d'assainissement alternatifs.

Elle doit également s'appuyer sur le **soutien à des projets de recherche-action territorialisés** permettant d'accompagner le développement concret de la circularité et de la sobriété en matière de N et P.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- **Verrouillage sociotechnique** autour des systèmes alimentation/excrétion linéaires responsables des dérèglements des cycles N et P (utilisation massive de fertilisations fossiles et de synthèse ; système d'assainissement centralisé valorisant peu les nutriments).
- **Manque généralisé de connaissances** sur le sujet des cycles biogéochimiques N et P et limites planétaires associées, de l'eutrophisation, des causes et conséquences.
- **Manque de prise en compte dans les politiques** publiques nationales et locales des dégradations environnementales associées aux fuites de N et P, manque de prise en compte, en particulier, de la dimension systémique du problème (assainissement / fertilisation)
- **Moyens** limités pour construire une **recherche scientifique interdisciplinaire**, pour une approche systémique des cycles N et P mettant en relation agriculture et assainissement.
- **Moyens** limités pour développer une **recherche transdisciplinaire et des outils de formation** sur la séparation à la source et la gestion circulaire des excréments humains (comparativement aux moyens mis sur les approches « bout du tuyau » (traitements supplémentaires en STEP, réutilisation des eaux usées traitées).

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- **Moyens humains** pour développer une **recherche scientifique interdisciplinaire entre sciences de l'univers et SHS**, pour une approche systémique des cycles N et P mettant en relation agriculture et assainissement >> en particulier, postes de chercheurs sur profils interdisciplinaires
- **Moyens financiers** pour développer la recherche inter et transdisciplinaire sur les cycles N et P, les systèmes alimentation/excrétion, la séparation à la source et la gestion circulaire des excréments humains

- Moyens humains et financiers pour développer des **outils de formations** sur le sujet à destination de différents publics (élus, professionnels des secteurs concernés, grand public).
- **Investissement public** et privé dans la mise en œuvre de projets et filières de séparation à la source et valorisation agricole des excréments

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

- **Développer la recherche interdisciplinaire** sur les systèmes alimentation/excrétion et l'approche systémique des cycles N et P (agriculture + assainissement)
- **Développer la formation**
- développer le **soutien aux projets pilotes et à l'innovation citoyenne** sur le thème
- **Favoriser l'investissement** public et privé dans la séparation à la source

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Le sujet des frontières planétaires associées aux cycles biogéochimique N & P, des systèmes alimentation/excrétion et de leur transition vers une approche sobre et circulaire se positionne en lien particulier avec le défi 4 « territoires du futur ». Trois raisons peuvent être évoquées :

- Les limites atteintes tant par les systèmes de production agricole que par les systèmes d'assainissement, largement dépendants des énergies fossiles et d'une eau abondante, **remettent en question la possibilité de maintenir des densités de population élevées dans des territoires aux ressources raréfiées** (cas des grandes villes), sauf à envisager des changements profonds dans les modes d'aménagement et de gestion des services urbains.
- la mise en œuvre de modes de gestion circulaires des excréments humains participe de la restauration d'un **mutualisme entre territoires urbains et espaces cultivés**, revenant sur la rupture métabolique associée à l'essor des énergies fossiles en agriculture et à celui du tout-à-l'égout pour l'assainissement.
- L'approche systémique des liens entre production agricole et gestion des excréments humains renvoie à des **études nécessairement territorialisées**, sur le plan de la production des constats et diagnostics comme sur le plan des solutions à mettre en œuvre.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Forçages terrestres et processus aux interfaces
Nom(s) et prénom(s)	Contribution du CEFREM
Adresse(s) mail	fbourrin@univ-perp.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	x
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	x
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	x
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	x
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	x
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	x
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	x
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	x
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	x
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	x
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	x
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les environnements côtiers terrestres (bassins versants, plaines côtières) et leurs interfaces avec la mer (lagunes, cordons sableux et rocheux, estuaires et pro-deltas) sont des lieux d'échange où interviennent activement les processus mécaniques, chimiques et biologiques. Ils sont le siège des transferts d'énergie et de matières dissoutes et particulaires vers la mer et interfèrent sur la dynamique du littoral ainsi que la composition chimique et la productivité biologique des eaux côtières. Ces environnements, particulièrement en Méditerranée, sont des zones densément peuplées et fortement aménagées qui induisent de fortes demandes/pressions sociétales, démographiques et économiques. En conséquence, les transferts de matière actuels sont altérés par les activités humaines et les environnements côtiers terrestres représentent des zones « hot-spot » d'étude des pressions anthropiques sur les ressources naturelles (eau, sédiment, matière organique,...), sur les habitats de la faune et la flore et sur leur biodiversité. L'amplitude de ces pressions répondent également au caractère saisonnier du climat et des afflux touristiques.

Dans ce contexte, d'une part les recherches du laboratoire du Cefrem ont pour objectif général de comprendre les interactions complexes entre les forçages climatiques et anthropiques et leur impact sur la ressource et la qualité de l'eau de surface dans les bassins versants et les lagunes. Elles doivent permettre de quantifier l'évolution récente des transferts géochimiques et sédimentaires vers la zone côtière et, par l'identification des facteurs de contrôle en amont, de produire des scénarios pour les années à venir, dans un contexte de changements globaux incluant le réchauffement climatique et amplifiés par l'augmentation de la densité de population sur ces zones littorales.

D'autre part, nos travaux dans ce contexte ont aussi pour objectif de mieux comprendre comment les apports chimiques et biologiques, l'éco-exposome, des zones côtières et des interfaces influencent les espèces animales sentinelles et les communautés microbiennes. Le but de ces recherches est de trouver des bioindicateurs de stress de la pollution et de les mettre en relation avec les autres facteurs de stress liés aux changements globaux incluant la présence d'espèces invasives ou la diminution des ressources haléutiques.

Enfin, une attention particulière dans ce contexte sera portée à l'étude des processus aux interfaces qui peuvent, lors du transfert des matières entre la terre et la mer, filtrer, transformer, multiplier et/ou retenir ces matières avant qu'elles agissent en mer.

Concernant les "Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques", des travaux de recherche (essentiellement croisement de données, modélisation statistiques, suivi de migration de population floristique) ont été entrepris dans cette direction. Il est notamment question du devenir des cultures locales (vignes). Dans un futur proche, il est envisageable de développer des modèles plus complexes afin d'étudier le comportement de systèmes forestiers ou de cultures dans le contexte de changement global à une échelle locale.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Sur la problématique des transferts de déchets anthropiques (plastiques) du bassin versant vers le littoral, nous sommes de plus en plus sollicités par les acteurs locaux (élus, gestionnaires d'espaces

naturels, associations environnementales) pour trouver des solutions. Notre expertise sur ces transferts nous permet de proposer des solutions dites "en amont", c'est à dire qui cible la source (le bassin versant) et pas le devenir (le milieu marin). En association avec une petite PME locale, nous proposons et invitons ainsi tous les acteurs à placer des pièges/collecteurs dans des fossés, des canaux qui drainent des zones de fortes production de déchets anthropiques (ex: centres commerciaux, parcs de loisirs,...). Ces solutions se veulent simples et économiques. Elles nécessitent cependant de l'investissement des services techniques des collectivités pour garantir la pérennité des dispositifs de remédiation. Nous proposons donc à toutes ces collectivités locales des petites formations destinées à leur personnel technique afin 1) de leur expliquer l'objectif du dispositif, 2) de les intégrer dans le projet et la diffusion des résultats et 3) de valoriser leur contribution.

Ces actions rentrent dans un cadre plus large de ré-appropriation de l'espace public. Si les déchets sont présents dans nos villes et nos espaces naturels, c'est souvent par capitulation, par manque de considération de cet espace public.

Ces actions interpellent aussi sur nos quantités de déchets produits, notamment sur les déchets (souvent plastiques) à usage unique.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

L'observation des flux pendant les événements extrêmes est très complexe. En océanographie, les planeurs sous-marins ou gliders se sont montrés extrêmement utiles pour observer les événements. Cependant la communauté française est en pleine restructuration autour des labos dont le CEFREM et va nécessiter un temps d'adaptation et des moyens humains pour converger vers un parc instrumenté national qui pourrait s'ouvrir aux utilisateurs extérieurs. En hydrologie et suivi des aérosols, la dernière tempête centennale Gloria a mis en évidence les limites de notre instrumentation classique : instrumentation rivière arrachée et/ou ensablée, flux de matière (particulaire/dissoute) atmosphérique bien supérieurs aux données de tempêtes classique rendant difficile l'analyse de données à des échelles temporelles plus grandes.

Toute modélisation nécessite d'être ancrée dans une réalité. Ainsi, le développement de stations expérimentales sur mer (telle que la bouée OCG) ou sur terre (pour le suivi d'écosystèmes). Celle-ci doivent être intégrées dans des réseaux de type SNO.

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Voici les défis inscrits par le CNRS dans son COP 2019-2023 :

Changement climatique : la plupart de nos activités concerne les changements globaux, ce qui inclut le changement climatique.

Inégalités éducatives : Implication de nos chercheurs dans des activités d'éducation (FDS, débats et tables rondes publiques, tribunes locales, partenaire scientifique pour la classe (66)) et de recherche citoyenne (LIVING LAB "Relais Science-Société" de la Ville de Carcassonne).

On remarque que ces activités sont peu valorisées.

Intelligence artificielle : Développement des pratiques liées à la modélisation par IA.

Santé et environnement : Nos recherches en écotoxicologie microbienne s'intéressent aux multirésistances liées aux polluants dans l'environnement et l'augmentation des antibiorésistances qui s'en découle.

Territoires du futur

Transition énergétique

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Vision intégrée du continuum Homme-Terre-Mer
Nom(s) et prénom(s)	Copard Yoann, Ludwig Wolfgang, Rabouille Christophe
Adresse(s) mail	yoann.copard@univ-rouen.fr, ludwig@univ-perp.fr, christophe.rabouille@lsce.ipsl.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	X
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	XXX
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	X
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	X
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

→ le Thème 12 est prioritaire, les autres sont qualifiés de secondaire

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Contributeurs : Y. Copard (M2C), C. Rabouille (LSCE), W. Ludwig (CEFREM)

UMR M2C : M. Debret, A. Jardani, N. Lecoq, N. Massei (M2C), M. Coquery (INRA-RiverLy), B. Mourier (ENTPE-LEHNA), F. Eyrolle, H. Lepage (IRSN-LRTA), F. Gibert (LMD, EP), D. Jézéquel (IPGP), MA. Bassetti (CEFREM), D. Faranda, M. Vrac, P. Yiou (LSCE), P. Larroudé (LEGI), A. Briand (LASTA)

Dans le cadre du défi 10 CHTM (Continuum Homme/Terre/Mer), la dernière prospective faisait état des apports de matière des fleuves et leur devenir dans les deltas/estuaires en intégrant différents enjeux d'ordre environnementaux mais aussi sociétaux. Cependant et depuis quelques années, les différents projets s'inscrivant dans le CHTM, qu'ils soient financés par l'ANR (incluant le PEPR FairCarboN) et INSU-EC2CO/LEFE, montrent clairement un cloisonnement de la recherche combinant objets d'étude (e.g. estuaire, delta, rivière) et disciplines scientifiques (hydrologie, géomorphologie, sédimentologie continentale, estuarienne et marine). Bien qu'intégrant localement les sciences humaines, ces projets, pouvant coupler observation et modélisation (érosion, transport, climatique), ne prennent donc pas en compte l'intégralité du continuum. Les grands observatoires basés sur des Infrastructures de Recherche (OZCAR, ILICO) sont d'ailleurs centrés sur des grands compartiments Terre et Mer séparés sans connexion réelle.

La première priorité vise à rassembler les différents grands champs disciplinaires des SIC dans les futurs projets portant sur le CHTM en intégrant ceux propres aux surfaces continentales, ainsi que ceux s'intéressant aux systèmes estuariens côtiers. Ceci devrait permettre de répondre à des questions de recherche portant sur l'ensemble du CHTM.

La seconde priorité, également d'ordre disciplinaire, est d'intégrer les SHS dans la prédiction (et la gestion) des flux de matière pour les prochaines décennies. Tout comme les projections climatiques, cette modélisation macro-économique apparaît essentielle car elle est à même d'estimer l'évolution de la gestion des surfaces continentales et des ressources en eau et donc l'impact de l'homme sur ces flux qu'ils soient dissouts ou particuliers.

L'atténuation du Changement Climatique est une priorité majeure et implique d'atteindre la neutralité Carbone à l'horizon 2050. Aussi, l'étude du Changement Global et plus particulièrement son impact (flux entre réservoirs et efficacité des puits) sur la dynamique du C demeure un enjeu crucial et un réel besoin apparaît sur la prévision des échanges de C pour ce siècle. **La troisième priorité intéresse l'intégration du cycle du carbone au sein du CHTM et les échanges associés entre les réservoirs (lithosphère, pédosphère, masse d'eau continentale et marine, atmosphère).** En particulier, si les futurs projets devront s'intéresser aux flux de carbone sous toutes ses formes (DIC, PIC, DOC, POC), ainsi qu'à leur nature et leur origine (e.g. hotspots continentaux), un focus sur les puits est nécessaire. En effet, les puits de carbone, incluant le Blue Carbon des interfaces Terre-Mer et des deltas ainsi que les puits continentaux, incluant non seulement les réservoirs (anthropiques ou naturelle) mais celui méconnu (et possiblement temporaire) présent le long des corridors fluviaux, seront à examiner. Il s'agirait alors d'évaluer leur extension spatiale, leur pérennité, leur efficacité et d'identifier des solutions visant à améliorer la séquestration. Enfin, la

dépendance de l'intensité et de la variabilité temporelle des événements érosifs majeurs à celles des extrêmes climatiques, exacerbée par l'impact de l'homme sur les surfaces continentales (LULUCF), devra être également examinée. Il apparaît alors indispensable d'aborder et de prévoir, pour les prochaines décennies, ce double contrôle climato-anthropique qui module les flux entrants de C aux interfaces TM et qui modifie les taux d'accumulation du C dans les différents puits (e.g. delta).

Les outils pour répondre à ces enjeux : observation et modélisation

Les observatoires déjà en place et gérés par les différents instituts (INSU, INEE, INRAE, IRSN) sont les briques élémentaires de l'acquisition de la donnée (flux de matière) et des échantillons. Les futures études, doivent bien évidemment s'articuler autour de ces observatoires mais aussi, et dans la mesure du possible, compléter leur dispositif (sondes, capteurs, campagnes de mesures, etc).

Dans les flux transitant dans les corridors fluviaux, l'origine et la réactivité (face à la (bio)dégradation) du C, son devenir et la variabilité spatiale et temporelle de ces flux, demeurent toutefois encore assez méconnus. Ceci est le plus souvent élucidé en caractérisant les formes du C en particulier sa forme organique particulaire (POC), par des méthodes classiques, depuis la spectroscopie (UV-VIS-IR) et la géochimie (globale, isotopique, moléculaire). Cette caractérisation intègre donc les échantillons prélevés aux stations mais aussi les échantillons source au sein des surfaces continentales. Le challenge visant à explorer toutes les sources possibles dans les bassins versants, notamment ceux présentant une dimension importante (dimension ZA), peut être en partie résolu par la modélisation qui permet d'identifier les endroits clés de l'érosion continentale et donc orienter les campagnes de prélèvement. Enfin, la quantification de la teneur en C des sources peut aussi être extrapolée à grande échelle à partir des fonds de carte numérisées et disponibles qui fournissent des indicateurs quantitatifs et qualitatifs du C. Les séries de données observées sur les flux de carbone devront ensuite être utilisées pour calibrer les modèles de transfert de matière dont l'amélioration peut être augmentée en utilisant des modèles de réseaux de neurones afin de produire des séries de données modélisées satisfaisantes. A leur tour, ces modèles de transferts de matière simulant érosion-transport-dépôt, peuvent être également alimentés par des projections climatiques ainsi que par des modèles macro-économiques. In fine, il sera donc possible de raffiner la prévision de la variabilité des flux de C sous contrôle climatique et anthropique pour les prochaines décennies.

L'investigation des puits de carbone continentaux, en particulier le long des corridors fluviaux est un point clé dans la compréhension du cycle du carbone. Leur distribution spatiale, leur volume et leur efficacité requièrent des études géophysiques, sédimentologiques en lien avec la dynamique des écosystèmes distribués le long des corridors et des aménagements anthropiques. Il est à noter que de telles études existent déjà sur le territoire national, en particulier le long du corridor rhodanien. La caractérisation du carbone piégé dans ces puits peut enfin être évaluée selon les méthodes identiques à celles proposées aux différents observatoires. Il sera nécessaire d'examiner la

variabilité spatiale et temporelle de ces dépôts et de prévoir leur évolution pour les prochaines décennies. L'analyse des archives sédimentaires continentales (rétro-observation), la mise en œuvre d'un couplage de modèles d'ordre climatiques et macro-économiques (changement d'usage des terres et des aménagements des corridors), dont la production de données servira de données d'entrée au LEM (Landscape Evolution Modeling) doivent permettre de répondre à cet enjeu.

Les échanges de C entre les masses d'eaux continentales et l'atmosphère, soit l'évasion du C, sont aussi à évaluer le long du CTM. Il en va de même pour les zones humides, généralement situés à l'interface TM, qui sont sensibles au Changement Global, en particulier aux événements extrêmes, exacerbés par la remontée du niveau global marin. A ce titre, des méthodologies dont certaines innovantes sont attendues. Pour les rivières et les lacs, la mise en place de capteur low-cost mesurant la pCO₂ en continu et la mise en place de chambre flottante peuvent être déployés sur les observatoires ou les stations instrumentés, voire sur certain secteur clé (confluence). Pour les zones humides, les méthodes d'observations des échanges surface continentale / atmosphère (e.g. Lidar mobile, station Eddy Covariance, tour à flux) devraient pouvoir être mises en œuvre afin de capturer la variabilité des flux de CO₂ et de CH₄. Le déploiement de ces méthodologies sur les zones humides, très dépendant du Changement Global, alimenterait alors les modèle Land-Surface (sous réserve de changement d'échelle : upscaling). Enfin l'extrême sensibilité de ces zones clés, qui sont à la fois un puits significatif de C, qui présente des écosystèmes spécifiques et qui sont l'objet d'enjeux socio-économiques majeurs, face au Changement Global, implique de relier des modèles permettant de prédire les entrées continentales (masses d'eau et sédiments) avec des modèles hydrodynamique développés aux interfaces (TELEMAC / DELFT 3D).

Le voyage du C transitant dans ce continuum s'achève en grande partie dans les zones côtières, les estuaires et deltas. Ces systèmes sont à la fois des réacteurs biogéochimiques complexes (e.g. estuaires) et des puits notables de C (deltas, fjords). A cet égard, la variabilité spatiale et temporelle de l'accumulation du C, et son origine (continentale, aquatique, géologique, anthropique), dépendante des évènements de crue, sont encore mal connues. Des campagnes courtes de prélèvements et de prospection sismique (bathymétrie différentielle), couplées aux observatoires placés à l'exutoire et des méthodologies adaptées visant à caractériser le C, notamment le COP (géochimie, spectroscopie) devraient pouvoir résoudre ces challenges que sont : la contribution des différentes origines du C, les données de taux d'accumulation et la compréhension de la variabilité temporelle et de l'intensité des crues à l'origine de ces dépôts. Des projets ambitieux financés par le PPR Océan / Climat tels que RiOMar s'inscrivent en partie dans ces questionnements. Ici encore et pour les prochaines décennies, l'impact du Changement Global, en particulier l'usage des terres, la gestion de la ressource en eau, l'aménagement des corridors fluviaux ainsi que la variabilité climatique, influencera ces décharges continentales. Le couplage des modèles climatiques, en particulier ceux visant à prédire les événements pluvieux extrêmes, des modèles propres aux surfaces continentales (LEM, hydrologique), et des modèles macro-économiques auront ici une importance capitale sur la variabilité de l'efficacité de ces puits de C.

L'étude des flux de et des capacités de séquestration du C au sein du CHTM nécessite donc un couplage observation / modélisation (climat, économie, transport/dépôt) associé à un décloisonnement des disciplines. A ce titre, le renforcement et le couplage des observatoires (capteurs, sondes, RH) est à promouvoir pour favoriser leur capacité d'acquisition de données et de collecte d'échantillons. Il nous semble aussi très important d'encourager les projets visant à mieux évaluer l'efficacité des puits de de C, en particulier le long des corridors fluviaux qui demeurent encore largement méconnus.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Transversalité entre les thèmes de la prospective : 4, 14, 16, 19, 20 – cette proposition, applicable pour tout type de CHTM, s'applique donc également à la recherche dans les pays « du Sud ».

La recherche des puits de C, en particulier continentaux impliquerait une responsabilité environnementale.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Verrous disciplinaires : décloisonnement entre les disciplines des SIC (surface continentale à environnement marin, atmosphère), incluant les SHS

Verrous méthodologiques/modélisation : couplage des modèles de type LEM avec les modèles visant à simuler l'impact de la remontée du niveau moyen des océans sur les interfaces T/M, (modélisation, changement d'échelle), couplage entre AI et modèles (e.g. LEM), couplage des modèle de type LEM, LSM, Hydrodynamique (TELEMAC), climatique, économique et ceux simulant la modification de la biosphère sous l'impact du Changement Global, procédures de descente d'échelles (modèle climatique), projection des événements extrêmes dans la modélisation climatique.

Verrous analytiques : pour l'analyse des archives sédimentaires construction d'un cadre chronologique hautement résolu, pour resituer très précisément les évolutions / événements dans le temps, pour intégrer processus court et long, pour quantifier les temps de réponse à des perturbations et de résilience (voir proposition M2C) – détermination de proxy hyperspectraux visant à restituer l'origine des matériaux et des différentes formes du carbone particulaire.

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Besoin : équipements visant à renforcer les observatoires, besoin RH associé aux observatoires et aux outils , besoin de spécialiste en AI et modélisation.

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Principalement le Défi 1 changements climatiques mais aussi le Défi 3 (AI) et 5 (Territoires du futur).

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	
Nom(s) et prénom(s)	UMR M2C Caen - Rouen
Adresse(s) mail	laurent.dezileau@unicaen.fr , maxime.debret@univ-rouen.fr , yoann.copard@univ-rouen.fr , Bernadette.tessier@unicaen.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) : "rétro-observation"	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Dans tous les compartiments du Continuum Terre - Mer, en particulier le compartiment estuarien, les zones qui accumulent des sédiments sont propices aux analyses en rétro-observation avec une très haute résolution (THR). Les données issues de l'analyse THR des enregistrements sédimentaires récents (derniers siècles, voire dernières décennies), le plus souvent non destructifs (e.g. caméra hyperspectral) permettent d'avoir un regard sur les fluctuations de flux de matières à différentes échelles de temps emboîtées, et de leur origine, et par ce biais, sur celles des paramètres (abiotiques et biotiques), qui régissent le fonctionnement et la trajectoire des géo-éco-systèmes. De telles données sont essentielles pour resituer leur fonctionnement actuel dans le contexte du changement global, et apporter des éléments pour la modélisation de leur trajectoire future.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Transversalité : entre différents thèmes des prospectives (entre autres 7, 8, 9, 14, 19...)

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

L'un des principaux verrous pour les analyses en rétro-observation sur les archives passées est la construction d'un cadre chronologique hautement résolu, pour resituer très précisément les évolutions / événements dans le temps, pour intégrer processus court et long, pour quantifier les temps de réponse à des perturbations et de résilience...

Pour le stockage de C : restituer l'accumulation, l'origine et la réactivité du C face à la (bio)dégradation de manière à apprécier l'efficacité de puits de C aux interfaces TM ; en particulier au niveau des estuaires et zones côtières (Blue C).

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Pour lever le verrou « chronologie hautement résolue », la communauté SIC doit disposer de moyens puissants de datation, en particulier de type OSL. Ces moyens sont quasiment inexistantes en France aujourd'hui.

Le développement de nouveaux proxies, chimiques, biologiques (... ?) pour le traçage des sources de nutriments, de matières et de polluants, le développement d'outils non destructifs permettant, via des fonctions de transfert, d'établir des proxies à haute résolution de paramètres classiques (e.g. COT wt.%)

Ces outils doivent s'accompagner de recrutement de personnels techniques hautement qualifiés (e.g. IR)

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Principalement défi 1 : « changements climatiques » et secondairement défi 4 : « Santé et Environnement »

Et plus globalement « Changement global » (impact anthropique sur son environnement - ex: estimation du bruit de fond géochimique, important pour mettre en évidence le facteur d'enrichissement des contaminants anthropiques; sur les transferts sédimentaires, etc..)

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Positionnement de la modélisation numérique de type Transport Réactif dans la communauté SIC
Nom(s) et prénom(s)	Tournassat Christophe & Cyprien Soulaïne
Adresse(s) mail	Christophe.tournassat@univ-orleans.fr Cyprien.soulaïne@cnrs.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	X
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	X
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	X
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	X
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	X
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	X
11-Les contaminants de la Zone Critique	X
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	X
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	X
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	X
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

La prospective SIC 2018-2022 a mis en avant la nécessité de « *Repenser la modélisation comme un outil intégrateur de connaissance et comme un exercice collaboratif* ». La compréhension et la prédiction du comportement des systèmes d'intérêt SIC nécessitent effectivement d'intégrer dans une représentation unique les échelles de temps caractéristiques du transport de la matière d'un réservoir à un autre, et celles des transformations de la matière. Ces transformations peuvent être mécaniques et chimiques sous l'influence de processus biologiques et abiotiques¹.

Parmi les méthodes disponibles pour effectuer cette intégration, la modélisation numérique de type transport réactif (reactive transport modeling, ou RTM) a su s'imposer depuis les années 1990 comme une approche viable et fiable pour de nombreux domaines tels que la prédiction du comportement des polluants dans l'environnement, celle de l'évolution des systèmes de stockage ou séquestration souterrains (historiquement nucléaire et CO₂ ; à présent H₂), ou encore la compréhension du fonctionnement de la zone critique. Grâce au RTM, des comportements complexes et couplés ont ainsi été expliqués dans de nombreux environnements avec une fidélité croissante dans la représentation des processus. Cependant, bien qu'elles en aient le potentiel méthodologique et scientifique, de nombreux défis demeurent pour faire de ces approches numériques de véritables fédérateurs et intégrateurs des activités SIC. Ces défis sont bien sûr d'ordre scientifique, mais également d'ordre organisationnel.

Parmi les défis scientifiques associés aux activités RTM, les sauts d'échelle sont identifiés depuis longtemps : les problématiques SIC nécessitent en effet de considérer l'influence de processus physico-chimiques caractérisés à une échelle moléculaire sur des observations faites jusqu'aux échelles des bassins versants voire des continents. Nos objets d'intérêt peuvent ainsi pleinement revendiquer être des cibles prioritaires des développements numériques dits Exascale.

A chaque échelle et pour chaque environnement, les couplages entre les processus sont hautement non-linéaires, et ce, même si l'on se restreint aux processus de premier ordre. Ces couplages font émerger des comportements nouveaux qui ne sont pas directement prédictibles par des modèles qui ne prennent pas en compte ces couplages. Le développement des techniques de modélisation stochastique se basant sur l'intelligence artificielle est souvent mis en avant pour découvrir, quantifier et prédire des effets de couplages jusqu'ici ignorés. Ces modèles nécessitent cependant d'être alimentés par des quantités très importantes de données, dont l'obtention peut être rendue difficile pour les systèmes où les moteurs sont liés à des réactivités biogéochimiques dans des environnements très hétérogènes, qui sont typiques de la zone critique. Une autre utilisation de ces techniques IA est de construire des modèles de substitution (surrogate models) permettant de réaliser, entre autres, des analyses en sensibilité sur des prédictions avec un coût de calcul bien moindre qu'avec le modèle initial. Les modèles de substitution doivent cependant être entraînés sur la base d'un jeu de réalisations du modèle initial, qui lui-même doit prendre en compte l'ensemble des couplages et échelles d'intérêt pour expliquer le phénomène modélisé. Pour nos objets SIC, les approches IA ne doivent ainsi pas être considérées comme une approche de remplacement des techniques de modélisation directe se basant sur les principes physico-chimiques de base de type RTM, mais comme un complément et un prolongement de ces approches pour relever les défis de chan-

¹ Remarque : dans ce texte, le terme physico-chimique doit s'entendre comme intégrant également l'ensemble des processus biologiques.

gement d'échelle, de couplage et de prise en compte des hétérogénéités qui sont caractéristiques de nos objets. Il est ainsi nécessaire d'encourager et de soutenir les projets de recherche sur la modélisation RTM en parallèle des efforts affichés sur la thématique IA si l'on veut aboutir à la création de véritables jumeaux numériques environnementaux capables de décrire nos objets SIC.

Une grande force mais également une grande faiblesse de la modélisation RTM est la nécessaire multidisciplinarité, et souvent interdisciplinarité, des chercheurs développant ces approches. Une fine connaissance des processus à l'œuvre dans l'environnement est nécessaire pour les traduire de façon fidèle dans une approche de modélisation numérique, demandant elle-même des connaissances poussées en mathématiques, algorithmique et en programmation. Partant d'un exemple local à l'ISTO, tout un ensemble d'activités propres du groupe aborde des points aussi divers que le couplage de la modélisation des transferts de l'échelle des pores à l'échelle du continuum, le couplage du transport réactif à la géophysique, le couplage du transport et du dépôt de particules avec la réactivité géochimique, ou encore l'information de modèles de réactivité biogéochimique avec des données métaomiques. Cette liste n'est pas exhaustive à l'échelle de notre laboratoire. Elle pourrait de plus être complétée par une multitude d'autres exemples explorés dans d'autres laboratoires INSU. Cependant, elle illustre déjà, à elle-seule, le panel de compétences et de cultures scientifiques nécessaires pour mener à bien des actions certes ponctuelles mais déjà hautement intégratrices, et dont certains résultats pourront certainement revendiquer le statut de recherche transdisciplinaire.

La nécessaire multidisciplinarité des acteurs de la recherche en RTM devient aussi une faiblesse du fait qu'il n'existe pas, à notre sens, de communauté RTM reconnue en tant que telle au sein de l'INSU-SIC. Des groupements de recherche traitant spécifiquement de certains aspects du RTM, tels que MoMas puis MaNu, portés par l'INSMI, ont fait progresser les recherches, mais sur un secteur très particulier lié à l'exactitude des algorithmes de résolution mais peu sur la complétude des approches. L'INSU-SIC devrait certainement prendre directement en main ce rôle intégrateur pour mener à bien son projet du précédent exercice de prospective « *Repenser la modélisation comme un outil intégrateur de connaissance et comme un exercice collaboratif* ». Un nouveau GdR axé sur les recherches méthodologiques en RTM serait un outil puissant au service de cet objectif.

Le financement des recherches en RTM au sein de l'INSU se fait, de par notre expérience, très majoritairement via une porte d'entrée thématique/objet et non pas via des financements directs de projet de recherche axés sur la méthodologie et le numérique. Le danger lié à cet état de fait est une vision « outil » du RTM à l'opposé de ce qu'il est vraiment, à savoir un sujet de recherche à part entière. Des entrées méthodologiques et numériques existent maintenant dans les appels d'offres ANR telles que l'Axe E.5 « Calcul haute performance, Modèles numériques, simulation, applications », avec des mots clefs qui s'appliquent pleinement aux développements RTM récents (hybride, CPU, GPU, FPGA, multi-coeurs, calcul intensif, multi-physique *etc.*). Une communauté RTM fédérée par un GdR piloté par l'INSU permettrait de mieux répondre collectivement à ces axes d'appel à projets tout en favorisant des produits de recherche plus facilement exploitables par la communauté SIC tout entière. Des financements sur un appel à projets de recherche méthodologiques, et non pas thématiques, au sein des projets INSU (Transverse, ou au sein de EC2CO par exemple) faciliteraient cette démarche de fédération.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Scientifiques : couplages, sauts d'échelles

Organisationnels : fédération d'un champ disciplinaire modélisation RTM au service de l'ensemble de la communauté INSU-SIC

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Recrutements bien sûr.

1 GdR dédié.

1 appel à projets INSU numériques méthodologiques et non pas thématiques

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

- Changement climatique
- Intelligence artificielle
- Santé et environnement
- Transition énergétique

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Dynamique des contaminants organiques et impact sur les écosystèmes
Nom(s) et prénom(s)	Hélène Blanchoud, Aurélie Goutte, Elodie Guigon, Thomas Thiébault
Adresse(s) mail	Helene.blanchoud@upmc.fr aurelie.goutte@ephe.sorbonne.fr thomas.thiebault@upmc.fr elodie.guigon@upmc.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	X
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

La liste des contaminants d'intérêts ne cesse de s'allonger à mesure que les techniques d'analyse permettent de détecter un nombre toujours croissant de micropolluants. Les sources et la dynamique de transfert de certaines substances sont maintenant connues mais leurs impacts sur les écosystèmes restent difficiles à mettre en évidence. Avec l'analyse non ciblée, il est possible d'avoir une empreinte de substances présentes simultanément dans un échantillon. Le travail consiste donc maintenant à comparer ces empreintes chimiques aux indicateurs de l'état de santé du milieu (indicateurs biologiques, diversité) en fonction des conditions du milieu (urbain, rural, agricole...), et à déterminer les cortèges moléculaires qui les composent, en particulier les liens éventuels entre composés parents et sous-produits.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

1. Caractériser les empreintes chimiques en fonction des milieux étudiés
2. Etudier l'évolution de ces empreintes chimiques (spatiale ou temporelle) et voir l'effet du milieu sur la transformation chimique (métabolisation, dissipation)
3. Etudier les répercussions sur les organismes et la résilience des écosystèmes

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

IR en chimie analytique

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Ces questions sont directement liées au défi santé – environnement

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Contribution OA pour le milieu urbain
Nom(s) et prénom(s)	Jean-François Léon pour le GT urbain de la prospective du domaine OA
Adresse(s) mail	Jean-francois.leon@aero.obs-mip.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	X
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	X
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	

20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

La prospective 2023-2028 du domaine Océan-Atmosphère identifie le milieu urbain comme une aire d'étude prioritaire en adéquation avec les défis scientifiques relevant du périmètre du domaine. La recherche en OA sur le périmètre urbain est à l'interface avec d'autres disciplines académiques, avec des acteurs opérationnels et socio-économiques et en lien direct avec des problématiques sociétales. Les questions traitées sont donc fortement interdisciplinaires et intersectorielles avec des implications directes sur la protection des populations face aux risques environnementaux et sur l'amélioration de la résilience et de la durabilité des villes. L'objet d'étude intègre les mégapoles et les villes moyennes dans différents types d'environnements géographiques, les fronts d'urbanisation et les zones côtières anthropisées.

Il est ressorti des discussions de perspectives la nécessité de renforcer les liens avec les autres communautés scientifiques qui sont au cœur des problématiques urbaines (hydrologie, qualité de l'eau, végétation, ...) et particulièrement avec le domaine SIC.

Concrètement, il existe une très bonne dynamique de la communauté OA sur les aspects de météorologie et climats urbains ainsi que sur les aspects qualité de l'air, avec le développement de stratégies, méthodes et outils dédiés spécifiquement aux environnements urbains. Sur ces thèmes, les différents cœurs de métiers de la communauté OA (observations, modélisation numérique, satellite, stockage et traitement des données) sont bien représentés.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des perspectives (si adapté) :

Quels verrous ? Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)

La liste ci-dessous reprend les verrous identifiés dans la prospective OA sur le milieu urbain.

Verrou 1 : Réchauffement climatique et microclimat urbain : mécanismes de couplage et impact sur l'habitabilité des villes.

On cherche à quantifier et à prédire les risques météorologiques aux différentes échelles (régionale jusqu'à hectométrique) et à évaluer comment des événements extrêmes se transforment en risque intégré pour la population urbaine

Verrou 2 : Impact de la ville sur le climat et l'environnement régional

L'impact de la ville sur son environnement, au moins régional, est un point crucial. La descente d'échelle opérée sur les modèles de climat dans le cadre du programme CORDEX a récemment

permis de produire des ensembles de simulations climatiques à une résolution horizontale (~3 km) qui permet désormais d'appréhender les interactions entre les villes et le climat régional.

Verrou 3 : Émissions de composés chimiques d'intérêt atmosphérique

On cherche à quantifier les sources d'émissions de gaz à effet de serre, de polluants gazeux et de particules, qu'ils soient déjà connus ou émergents. La construction des cadastres nécessite une connaissance approfondie du fonctionnement de la ZCU.

Verrou 4 : Quel impact sanitaire en relation avec le risque chimique et climatique ?

En raison de l'occurrence de vagues de chaleur régionales, le risque sanitaire lié à l'effet de surchauffe en milieu urbain doit également être mieux évalué ainsi que ses interactions avec la composition de l'atmosphère.

Verrou 5 : Les sciences atmosphériques au cœur de la société urbaine

Il n'existe pas vraiment de modèle de fonctionnement sur la co-construction des connaissances avec la société civile pour aborder les questions de l'environnement urbain et il semblerait intéressant de pouvoir disposer d'une vision plus générale des modes de fonctionnement de chacun.

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) *Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Les éléments listés ci-dessous reprennent les opportunités identifiées par la communauté OA pour la zone critique urbaine et qui en ce sens correspondent également à des besoins à moyens termes.

1 : Les observatoires

Les observatoires et les super-sites sont des outils importants du lien entre acteurs académiques et opérationnels même si à ce jour on constate une grande disparité entre les différents domaines d'étude (qualité de l'air, météorologie urbaine, océanographie côtière). Ils garantissent un suivi sur le moyen et le long terme des variables d'intérêt pour les questions de pollution atmosphérique et de changement climatique. Ils sont un point d'ancrage important pour la mise en place de campagnes de mesures et jouent un rôle essentiel dans la co-construction des services atmosphériques entre les structures opérationnelles et la recherche. Dans ce contexte, le nouveau service national d'observation OBSERVIL, labellisé par l'INSU en 2020 semble être une initiative importante qui pourrait permettre d'élargir notre champ thématique (hydrologie urbaine, pollution des eaux, ...). En ce qui concerne les mégapoles émergentes au Sud, dont les problématiques sont souvent amplifiées par rapport aux villes du Nord, la communauté OA est fortement impliquée et bénéficie des outils de coordination de l'action scientifique au niveau des organismes (eg. Communauté de Savoir Ville Durable de l'IRD) et des agences (eg. Belmont Forum, Future Earth).

2 : Les moyens expérimentaux

La communauté OA dispose ou est capable de développer l'instrumentation scientifique permettant d'accéder finement aux paramètres des processus dynamiques ou chimiques. De plus, les nouvelles plateformes mobiles (drones, ballons...) ouvrent des opportunités d'accès à de nouvelles échelles

spatiales et temporelles. Parallèlement, la densification des réseaux de mesures urbains via la participation citoyenne est une véritable opportunité qu'il convient de mieux exploiter, tout en gardant à l'esprit que la capacité de la ville à densifier très rapidement un réseau de mesures ne doit pas amener à inonder celle-ci de futurs déchets électroniques. La communauté OA est fortement impliquée dans les missions d'observation de la Terre et les futures missions spatiales opérationnelles ou à vocation recherche et les services associés (eg. Space for Climate Observatory) seront essentiels pour l'étude de l'environnement urbain.

3 : La modélisation numérique

L'apparition récente des modèles climatiques kilométriques urbanisés, notamment dans le cadre de CORDEX, permet maintenant d'étudier les interactions entre ville et climat régional, mais aussi les impacts associés en milieu urbain, ouvrant la voie à la conception de services climatiques tenant compte des échelles climatiques à urbaines. La tendance forte de descente en échelle des outils de modélisation, via parfois des changements de paradigme dans l'approche numérique (e.g. Monte-Carlo), permet aussi de représenter les processus physiques (ie. structure infra-urbaine de l'îlot de chaleur urbain) et chimiques (ie. chimie radicalaire, composés semi-volatiles) l'échelle de la rue. Ceci ouvre la voie au développement et à la validation de paramétrisations novatrices pour les modèles à résolution moins fine. A l'instar des approches couplées utilisées pour modéliser le climat, il existe également la volonté de développer des approches de modélisation intégrées pour la ville. Cela passe par le couplage des modèles de météorologie et de qualité de l'air à l'échelle urbaine mais on doit imaginer d'aller au-delà pour répondre à des questions croisées sur les effets de l'urbanisation, du changement climatique et des aménagements du territoire. Le développement des approches de modélisation intégrées pour la ville avec la volonté de mieux caractériser les impacts et les risques à l'échelle des populations pourrait bénéficier du développement de l'intelligence artificielle (IA) pour représenter les impacts à très fine échelle à partir de modèles de plus grande échelle.

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

Plutôt qu'en terme d'ordonnancement de tâches, on liste ici les priorités identifiées par la communauté OA pour la ZCU.

En ce qui concerne le milieu urbain, la priorité est de procéder à **une descente d'échelle, en modélisation et en observation**, permettant de rendre compte des hétérogénéités intra-urbaines et des mécanismes de couplages avec le milieu extra-urbain, y compris le milieu marin côtier. Le développement de modèles intégrés pour la ville doit être encouragé tout en veillant au coût numérique, et donc environnemental, de la démarche. **Un accès fluide aux données de la recherche, de l'opérationnel et aux données connexes utiles pour les études pluri-disciplinaires** (données de santé et socio-économiques, données descriptives de la ville et de ses composants) est essentiel à tous les niveaux d'acteurs (académiques, institutionnels et citoyens). Un effort est attendu sur les moyens expérimentaux : **renforcement du potentiel expérimental et du rôle de coordination des super-sites urbains**, nouveaux moyens mobiles d'investigation, intégration des données participatives dans les bases scientifiques, missions satellitaires à haute résolution spatiale. L'objectif est d'améliorer nos connaissances à la fois sur les processus physiques et chimiques (parfois jusqu'à la micro-échelle) et biophysiques pour les surfaces urbaines et péri-urbaines, mais aussi sur les

processus socio-économiques des villes. Pour cela, l'**interface avec les acteurs académiques et socio-économiques en lien avec l'aménagement du territoire** et la surveillance opérationnelle est essentielle et doit être mieux coordonnée. De même, il convient de renforcer le partage interdisciplinaire des pratiques et des expériences au sein de la communauté académique et des instituts de recherche.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

1. Changement climatique
4. Santé et environnement
5. Territoires du futur

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Apport de la modélisation physique au suivi de l'évolution des zones de pergélisol côtier
Nom(s) et prénom(s)	Marianne Font-Ertlen, Dominique Mouazé
Adresse(s) mail	marianne.font@unicaen.fr , dominique.mouaze@unicaen.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	XX
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	X
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	/
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Parmi les milieux présentant une extrême sensibilité au réchauffement climatique, le domaine périglaciaire et les zones à pergélisol sont parmi les plus dynamiques. La majorité des zones périglaciaires s'étendent en domaine continental des hautes latitudes Nord. Situé à l'interface entre ces grandes étendues de sol gelé et l'océan Arctique, le linéaire côtier est le siège d'intenses processus d'érosion. Plus de 30 % des côtes mondiales sont constituées d'un substrat gelé (~ 115 000 km) dont plus de la moitié présente des signes de recul significatif (0,5 m/an en moyenne avec des extrêmes atteignant 10 m/an ; Lantuit *et al.*, 2012). Les modèles les plus récents prévoient que le taux d'érosion moyen du littoral arctique augmentera et dépassera très probablement sa plage de variabilité historique avant la fin du siècle dans un large éventail de scénarios d'émissions. La sensibilité de l'érosion au réchauffement devrait doubler (Nielsen *et al.*, 2022).

Rien qu'en Alaska, près de 180 communautés sont affectées par la dégradation du pergélisol côtier (IPCC, 2020). La dégradation des côtes à pergélisol est favorisée non seulement par la montée du niveau de la mer et par l'augmentation des températures atmosphériques et marines, mais aussi par la réduction de la surface de la banquise protectrice (Overeem *et al.*, 2011), l'augmentation de la durée de la période d'eau libre et, en conséquence, de l'impact de l'augmentation des épisodes de tempête et des hauteurs de vagues (Jones *et al.*, 2020). Un autre facteur structurant réside dans la morphologie des zones côtières et dans la structuration du sol en sédiment et en glace. Les taux d'érosion majeurs touchent les littoraux constitués de dépôts sédimentaires non consolidés, soit près de 65 % du linéaire côtier, les côtes rocheuses étant moins affectées.

Compte tenu du rythme de plus en plus rapide des changements environnementaux et sociaux en découlant, il est de plus en plus nécessaire d'instaurer une collaboration internationale entre les chercheurs et les sociétés locales touchées pour se concentrer sur les côtes à pergélisol en transition. La résolution de la cartographie des côtes à pergélisol en érosion s'améliore avec l'augmentation des mesures *in situ* et l'acquisition de données spatiales et aéroportées, dans le cadre de programme de recherche nationaux et internationaux (Canada, Europe, Russie, USA).

Ces données permettent d'affiner les modèles d'évolution du littoral arctique. Néanmoins, il reste à compléter la base de connaissances sur les changements côtiers liés au pergélisol de la région de pergélisol continu et au-delà, pour inclure les côtes vulnérables situées dans la zone de pergélisol discontinu ainsi que les côtes de pergélisol rocheux. La formation d'équipes de recherche pluridisciplinaires maîtrisant des outils complémentaires accroît la portée et l'ampleur des études menées. La contribution à la prospective SIC repose sur l'initiation d'une collaboration à deux niveaux : 1) en premier lieu, entre enseignants-chercheurs de disciplines complémentaires, géomorphologue périglacialiste et mécanicien des fluides, au sein de l'UMR M2C et 2) avec l'équipe de Jacob Stolle, ingénieur côtier, coresponsable scientifique du laboratoire Hydraulique Environnement de l'INRS de Québec (Canada) au cœur de la problématique des changements futurs de la dynamique du pergélisol côtier et de son impact potentiel sur l'environnement naturel et bâti.

L'objectif de la proposition est de caractériser un certain nombre de paramètres impliqués dans les processus de dégradation du pergélisol côtier (thermo-dénudation et la thermo-abrasion) afin de les hiérarchiser dans leur effet propre et de mettre en évidence les probables interactions entre eux, par une approche expérimentale.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)

- Fiabiliser l'acquisition de mesures fiables de vitesse d'érosion et de transfert thermique à partir de modèles physiques simples et reproductibles, puis les adapter *in situ*. Chaque expérimentation porte une part de risque, et la proposition faite ici est particulièrement audacieuse. Etudier la dégradation de blocs de sédiments gelés dans un canal à houle comporte de nombreuses inconnues techniques, logistiques et instrumentales.

- Définir comment les différents paramètres affectent respectivement le transport et les vitesses de dégradation, donc le taux de recul des côtes. Cela implique un cahier des charges comportant de nombreuses expériences étant donné le nombre de paramètres impliqués. Même si les expérimentations permettent d'abroger les temps d'inactivité des processus *in situ*, la complexité du système implique une série d'expériences sur plusieurs années.

- Arriver à distinguer les processus impliqués dans la dégradation de pergélisol en milieu aqueux. Cela s'appuie sur le point précédent et sur les mesures *in situ*, nécessitant un suivi sur le long terme, étant donnée la vitesse des processus associés aux cycles de gel/dégel annuels, saisonniers, journaliers.

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

L'UMR CNRS M2C est à l'heure actuelle un des rares laboratoires à l'échelle internationale à disposer de plateformes expérimentales portant sur la mécanique des fluides appliquée aux environnements côtiers (<https://m2c.cnrs.fr/poles-de-competences/mesocosmes-et-modelisation-analogique/>) et sur l'action du gel sur les roches et les sols (CryoEx : <https://m2c.cnrs.fr/poles-de-competences/cryoex-chambres-froides-et-environnement-periglaciaire/>). En témoignent les collaborations avec les universités de Cardiff, du Sussex ou de Zurich, mais aussi avec des collègues de l'UMPC, d'Orsay ou de Bordeaux, de Nantes (ANR Permolarde en cours) ou de Québec (co-tutelle de thèse internationale de J. Clément, en cours).

Le suivi expérimental en laboratoire offre des possibilités uniques d'acquisition de données détaillées dans un cadre qui peut être aisément contraint avec des pas de temps accélérés, quand les pergélisols sont difficiles d'accès sur le terrain, avec des périodes d'acquisitions des données obligatoirement longues (plusieurs années). Les observations et quantifications réalisées dans un cadre expérimental offrent l'expérience de visualiser, analyser en temps réel et mieux comprendre des processus d'érosion périglaciaires et leurs interactions difficilement appréhendables *in situ*. En ce sens, les expériences physiques sont un outil complémentaire aux mesures sur le terrain et à la modélisation numérique, mais trop souvent négligées.

Les besoins se résument :

- au soutien financier de base nécessaire à l'entretien des plateformes expérimentales (jouvence, fluides, entretien annuel),

- mais surtout actuellement à la présence de personnel de qualité, tant au niveau technique (gestion des fluides et du bâti) qu'instrumental (conception, conditionnement de capteurs, suivi long terme des expériences). Deux AI (Bap J et Bap C) pérennisés sont donc souhaités.

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

L'intérêt est de coupler les approches afin d'arriver à une meilleure caractérisation des processus d'érosion du pergélisol en milieu aqueux. Cela comprend :

- une approche expérimentale réalisée au laboratoire M2C Caen qui consiste en l'étude de la dégradation de blocs de pergélisol expérimentaux en canal ou en bassin. Nous proposons de caractériser, à l'aide d'expérimentations en canal à houle, la dégradation de blocs de pergélisol selon (1) le rôle de l'océan qui intervient au travers de la température, la salinité, la charge en blocs de glace (effet de sape) et (2) le rôle de la nature et la structure de la côte au travers de la lithologie des blocs de pergélisol (granulométrie, stratification), la quantité de glace présente dans le sol et sa structure

(interstitielle, coins de glace, lentilles de glace de ségrégation ou glace massive). Relativement peu de travaux ont été effectués sur la modélisation physique de pergélisol côtier (Korte *et al.*, 2020), les expériences proposées en canal à houle ont donc un intérêt fondamental important.

- une approche de terrain sur le site de Cambridge Bay (Nunavut) avec une surveillance de l'évolution du trait de côte grâce à différents capteurs, et une caractérisation du pergélisol local. Cela n'est réalisable qu'en collaborant avec des partenaires locaux (LHE, INRS). L'accès au site de Cambridge Bay, actuellement site pilote canadien dans l'étude de l'érosion des côtes à pergélisol, est un énorme avantage. Cambridge Bay est un site idéal pour la collecte de données en vue de la validation d'un modèle numérique sur l'érosion du pergélisol. Le hameau de Cambridge Bay est situé sur un esker (mélange de sable et de limon) avec de hautes falaises et une végétation limitée, ce qui réduit la complexité du développement à la fois des expérimentations et du modèle numérique. Le hameau abrite également le centre de recherche POLAR Knowledge, permettant d'utiliser des équipements et des moyens de transport peu accessibles en Arctique.

Ces études de terrain sont indispensables à la description des objets étudiés et à la compréhension des processus. Sans elles, il sera impossible d'affiner les protocoles expérimentaux et les paramètres d'entrée des modèles, et d'ancrer les résultats et analyses. Au cours de ces missions, seront réalisés une étude géomorphologique de la zone, des levés photogrammétriques et thermiques de la frange littorale, une analyse sédimentologique et structurale du pergélisol, la mise en place de capteurs de températures, relevés lors des campagnes suivantes.

- une approche théorique soutenue par le développement d'un modèle numérique par l'équipe de l'INRS. Ce modèle est actuellement en cours de développement dans le cadre d'un projet conjoint entre l'INRS et l'Université de Dalhousie (Canada). Il s'appuie sur des modèles morphologiques côtiers et des modèles d'eau souterraine froide pour inclure l'érosion mécanique par l'action des vagues. Les résultats des expériences de modélisation physique seront directement utilisés pour valider les résultats du modèle numérique et pour affiner les projections des taux d'érosion côtière polaires (Nielsen *et al.*, 2022).

L'idéal réside dans de multiples *feedbacks* permettant d'alimenter et de faire évoluer ces 3 tâches en parallèle.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Cette contribution s'inscrit pleinement dans le défi sociétal portant sur les enjeux climatiques. Les expérimentations et observations qui seraient mises en place permettront de mieux comprendre les SIC dans une région du monde où il y a peu d'observatoires sur le continuum terre-mer.

« Les problématiques Terre-Mer et Cryosphère-Océan sont indissociables en termes de recherche. Les deux pôles sont reliés par une même réalité océanique » (O. Poivre d'Arvor, Équilibrer les extrêmes - Stratégie polaire de la France à horizon 2030, Mars 2022). Quand on entend les termes Océan et Climat dans un contexte polaire, on associe les interfaces océan-atmosphère ou océan-banquise, mais plus rarement océan-pergélisol. Or le pergélisol à l'interface avec l'océan contribue aux échanges thermiques, aux échanges d'eau douce, de gaz dissous, de matière organique, de sédiments. Le pergélisol est une SIC qui appartient à la cryosphère, et l'impact de sa dégradation sur la dynamique de l'océan arctique est loin d'être totalement intégré. Nous souhaitons, avec l'appui de nos moyens analytiques et expérimentaux, participer à la prise de conscience du rôle de l'érosion des côtes à pergélisol sur la dynamique climatique globale.

Nos moyens expérimentaux pourraient aussi être disponibles aux collègues du projet d'observatoire de la zone critique dans les TAAF, à ceux du PEPR FairCarboN, et autres actions ou projets structurants portés par le CNRS.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Cycles bio-géochimiques des éléments stratégiques : approches interdisciplinaires intégrées du manteau à l'impact environnemental dans les SIC ou comment associer géologues et écotoxicologues
Nom(s) et prénom(s)	Giamberini Laure & Laetitia Minguez (LIEC UMR CNRS 4360), Anne Sylvie André Mayer (Géoressources), Yves Marrochi (CRPG) et al
Adresse(s) mail	laure.giamberini@univ-lorraine.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2- Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3- Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4- Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5- Des outils aux données et aux connaissances	
6- La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7- Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9- Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10- Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11- Les contaminants de la Zone Critique	3
12- Le continuum Homme/Terre/Mer	
13- Le continuum biotique/abiotique	1
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	5
15- L'éco-hydrologie	
16- Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17- Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	4
18- L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19- Les échelles de temps dans les SIC	
20- L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	2
21- Energie et transition énergétique dans les SIC	
22- Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Dans le cadre du Labex Ressources du XXIème siècle et d'autres projets internationaux associés nous menons des recherches sur un certain nombre de métaux stratégiques (ex. Éléments Terres Rares, Lithium, Nickel) réalisées sur une grande partie de leur cycle de vie, depuis l'exploration de nouveaux gisements, leurs transferts dans la biosphère à l'analyse environnementale pre- et post-exploitation. Les projets sont forcément multidisciplinaires mais aussi interdisciplinaire abordant des questions de recherches fondamentales dans les disciplines de géologie structurale, traçage isotopiques, géochimie, pétrologie, pédologie, physico-chimie environnementale, écologie, écotoxicologie, biologie moléculaire, modélisation mais également des actions plus finalisées (recherche de gisements secondaires, économie circulaire, actions de restauration).

Cette approche holistique permet d'étudier les éléments métalliques depuis leur formation et présence dans la croûte terrestre et les sols, leur fractionnement magmatique jusqu'au produit final minéralisé, leurs altérations, leur présence dans les systèmes aquatiques associées à l'étude de leurs phases porteuses.

Aux niveaux des compartiments terrestres et aquatiques continentaux leurs transferts trophiques sont étudiés ainsi que l'évaluation de leurs écotoxicités potentielles. Les impacts environnementaux sont évalués d'une manière intégrée à tous les niveaux de l'organisation biologique depuis les niveaux moléculaires jusqu'aux niveaux écosystémiques.

Ces études relevant de nombreuses disciplines de géologie, de sciences environnementales et de sciences du vivant fournissent un ensemble de données intégrées dans une perspective d'analyse du cycle de vie des éléments stratégiques et une meilleure connaissance de leurs cycles bio-géochimiques et de leurs perturbations. Dans la projection des transitions énergétiques et écologiques, pour lesquelles ces métaux critiques ont une forte importance, et de leur challenges à relever, une approche holistique et non plus *in silo* est maintenant nécessaire.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Compréhension des cycles des éléments métalliques depuis le manteau jusqu'aux SIC

Responsabilité environnementale

Acceptabilité sociétale

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Compréhension des interactions multiples des cycles bio-géochimiques et de leurs perturbations

Compréhension de la résilience des écosystèmes perturbés

Multidisciplinarité et interdisciplinarité entre communautés de scientifiques relevant de « Terre solide » et SIC

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Santé et environnement - Transition énergétique

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Modélisation couplée bio-géochimie-transport de matière
Nom(s) et prénom(s)	GERARD Frédéric
Adresse(s) mail	frederic.gerard@inrae.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	x
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	x
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	x
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	x
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Je compte proposer à la communauté SIC un outil moderne de modélisation couplant la plupart des processus biologiques, géochimiques, et physiques (transport de matière), et qui est :

- 1) développé internationalement ;
- 2) multi-échelle (d'espace, 1D-3D, et de temps) ;
- 3) basé sur une représentation mécaniste (autant que faire se peut) des processus à l'échelle macroscopique (maillage);
- 4) et dont les capacités ont été/sont démontrées par de nombreuses applications publiées.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- Une licence (gratuite) doit être prise par l'INSU, plutôt qu'indépendamment par chaque institut (actuellement INRAE et CIRAD) afin que la communauté SIC détienne pleinement cet outil.
- Diffuser cet outil/les approches sous-jacentes auprès des étudiants/(jeunes) chercheurs afin d'éviter de pérenniser son ignorance.

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- Besoin de RHs en informatique (développement logiciel et calcul scientifique).
- Financements souples et pérennes permettant de soutenir des interactions fortes à l'international sur le long terme.
- Utilisation de cet outil en enseignement.

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

- Développer une interface logicielle afin de faciliter (grandement) son usage.
- Prise en main des sources informatiques par des ingénieurs calcul scientifique (près d'un million de lignes de code, méthodes numériques, calcul parallèle, etc.).
- Peaufiner la prise en compte de certains processus (e.g. érosion mécanique, bioturbation).

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux
(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Contribution de la CSIIT à la prospective SIC
Nom(s) et prénom(s)	CSIIT (Commission Spécialisée Instrumentation Innovante transverse)
Adresse(s) mail	eric.defer@aero.obs-mip.fr (Président de la CSIIT)

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	X
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	X
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	X
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	X
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Comme pour les autres domaines de l'INSU, la communauté SIC utilise des observations en laboratoire, in natura, aéroportées et spatiales à différentes échelles temporelles pour mener ses études thématiques. Avec de nouvelles possibilités technologiques (par exemple la miniaturisation des composants ou encore de nouveaux moyens de télécommunication), de nouvelles spécifications opérationnelles (par exemple la frugalité ou encore le déploiement sur des sites distants), de nouvelles contraintes énergétiques et environnementales, il est plus que nécessaire de partager les expertises entre équipes SIC mais aussi de profiter des développements techniques et méthodologiques menés par les équipes instrumentales des autres domaines de l'INSU, des autres instituts du CNRS et au sein des partenaires de l'INSU. Ce partage de connaissances doit couvrir les différentes étapes du développement d'un instrument : de sa conception à son recyclage en fin de vie, en passant par l'étalonnage et son maintien en condition opérationnelle selon des pratiques environnementales maîtrisées. Il est bon de rappeler que tout développement instrumental doit bien sûr apporter une solution technique et technologique à une problématique scientifique.

Pour le développement instrumental mais aussi le maintien en condition opérationnelle, la Commission Spécialisée Instrumentation Innovante Transverse (CSIIT) de l'INSU encourage des interactions entre équipes du domaine SIC mais aussi avec des équipes des autres domaines de l'INSU, du CNRS et des partenaires de l'INSU afin de partager pratiques et enseignements tirés de développements instrumentaux. Ces échanges doivent porter tant sur les systèmes et sous-systèmes de l'instrument, que sur les succès et échecs rencontrés. De tels échanges peuvent être initiés au sein des groupements instrumentaux des OSU, en interagissant avec la Division Technique de l'INSU, ou encore à travers les différents réseaux du CNRS, les projets PEPR, et lors de l'Atelier Expérimentation et Instrumentation (AEI) qu'organise la CSIIT tous les deux ans. Le programme national IIT (Instrumentation Innovante Transverse) est quant à lui un moyen de mettre en pratique de tels échanges sous la forme d'un projet instrumental accompagné d'une montée en maturité. Ce programme met d'ailleurs à disposition un premier catalogue de technologies disponibles issues des développements menés dans le domaine AA (Astronomie-Astrophysique) en attendant la mise en place de ressourceries.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Les recommandations de la CSIIT portant sur l'instrumentation transverse appliquée au domaine SIC doivent être considérées en lien avec la formation (par exemple interdisciplinarité ; fonctionnement en méthode « projet »), l'aspect RH/métiers (par exemple acquisition, partage et diffusion des connaissances ; nouvelle expertise), recherche bas carbone et responsabilité environnementale (par exemple éco-conception depuis l'étude papier au recyclage en fin de vie ; développement instrumental ; maintien en condition opérationnelle).

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)

Tout développement instrumental doit bien sûr apporter une solution technique et technologique à une problématique scientifique.

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

Non évalué.

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

Non évalué.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Les recommandations de la CSIT portant sur l'instrumentation transverse appliquée au domaine SIC doivent contribuer aux activités scientifiques et techniques en lien avec le Défi n°1 « Changement climatique », le défi N°4 « Santé et environnement », le défi n°5 « Territoires du futur » et le défi n°6 « Transition énergétique ».

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Contribution de l'équipe de géochimie d'ISTerre
Nom(s) et prénom(s)	Gautheron Cécile
Adresse(s) mail	Cecile.gautheron@univ-grenoble-alpes.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	x
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	x
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	x
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	x
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Nous avons en tant qu'équipe de Géochimie d'ISTerre regroupant des compétences diverses sur l'évolution de la zone critique dans le temps et de la dynamique des transferts des métaux et métalloïdes et le rôle du biotique dans les transferts. Par la suite, nous avons posé une suite d'idées et de verrous sur les 4 items relevant de notre compétences

11-Les contaminants de la Zone Critique

Parmi les problématiques sociétales, nous avons identifiés la problématique autour des pollutions aiguës vs pollutions diffuses en métaux et métalloïdes, qui restent d'actualité. Il manque toujours des solutions de remédiation et/ou valorisation pour les sites fortement contaminés, stériles miniers, déchets industriels comme les phosphogypse, etc... . A l'autre extrémité, la pollution diffuse des agrosystèmes est elle aussi une problématique sociétale majeure, qui intéresse bien sûr au premier chef l'agronomie, mais nécessite une approche trans disciplinaire (sciences de la Terre, Sciences de la vie, SHS). De plus, nous avons identifiés les territoires du Sud (zone intertropicale), qui comprennent des territoires particulièrement impactés par les problèmes de contaminants métalliques d'origine naturelle ou anthropique, liés aux activités minières ou à certaines pratiques agricoles.

De plus, le lien entre contaminants et santé est évident. Concernant les métaux, on peut citer deux exemples qui concernent des polluants dits traditionnels. Le saturnisme, qui existe encore en France, et l'exposition au cadmium, pour laquelle une étude récente montre des niveaux d'imprégnation de la population française qui sont inquiétants. <https://www.santepubliquefrance.fr/docs/impregnation-de-la-population-francaise-par-le-cadmium.-programme-national-de-biosurveillance-esteban-2014-2016>.

A ces métaux et métalloïdes traditionnels s'ajoutent les contaminants émergents, notamment les terres rares, dont la toxicité est mal connue.

Verrous : L'étude de la spéciation des métaux et métalloïdes dans le cas de pollutions diffuses reste un challenge analytique. Il est en passe d'être levé grâce aux développements de nouvelles techniques physiques comme la HERFD-XAS (high energy fluorescence detected X ray absorption spectroscopy), et de techniques chimiques couplées.

13-Le continuum biotique/abiotique

Tandis que la précédente prospective (2018-2022) a mis en évidence trois grands enjeux de notre compréhension des *liens* biotique-abiotique, principalement par le prisme des processus couplés vivant/non-vivant, la présente prospective a pour ambition d'explorer leur interconnexion sous la forme d'un *continuum*. Une question importante à relever pour la nouvelle prospective sera de quantifier la présence ou non d'une frontière entre le vivant et non-vivant, ainsi que les processus associés ? Vivant et non-vivant, ainsi que les systèmes sous leur contrôle respectivement biotique et abiotique, se distinguent « historiquement » en grands domaines disjoints. Cette distinction devient caduque dès lors que l'on considère les processus sous-jacents, tels que le cycle des éléments entre

compartiments biotiques et abiotiques. Cette thématique fait écho à plusieurs grands défis sociétaux, tels que le changement climatique, la santé et l'environnement, ainsi que les territoires du futur.

Se pose, en corollaire, la question de l'existence de biosignatures, c'est-à-dire d'empreintes structurales ou (geo)chimiques (élémentaires, isotopiques, minéralogiques, etc.) de l'action du vivant sur le non-vivant. Se pose également la question de l'action réciproque de forçages d'origine climatique ou tectonique et de leurs conséquences (hydrologiques et géochimiques par exemple) sur la diversité taxonomique et/ou fonctionnelle du vivant. Enfin, comment s'organise cette coévolution du vivant et du non-vivant à différentes échelles d'espace et de temps ? Comment les différents forçages et rétroactions aboutissent à une évolution conjointe des composantes biotique et abiotique des sols, aquifères, et des autres compartiments de la zone critique ?

Ces questions portent d'importants défis fondamentaux, et font écho à de nombreux défis environnementaux et sociétaux actuels. Elles constituent, entre-autres, un défi majeur pour une compréhension plus aboutie de l'évolution des stocks de carbone et de nutriments dans différents compartiments du système Terre, ainsi qu'une meilleure prédiction de leur évolution. Ces processus et les échelles de temps associés sont centraux pour une gestion durable des environnements naturels et anthropisés, notamment le développement pérenne des agro-écosystèmes sous tension dans les pays du Sud.

Verrous : La quantification des transferts élémentaires au sein du continuum biotique/abiotique demeure limitée, en particulier dans des environnements naturels complexes, faute de méthode de mesure adaptées. L'identification formelle des processus biotiques et abiotiques associés et leur contribution respective sur le terrain demeure un défi, en particulier du fait d'une dichotomie existant entre approches de laboratoire et de terrain.

Besoins : D'importants développements méthodologiques doivent être poursuivis, en particulier concernant l'élaboration de méthodes de mesure innovantes (sondes passives de terrain, utilisation de grands instruments), et accroître la perméabilité entre laboratoire et terrain (incubation d'échantillons-test dans le milieu naturel, utilisation d'instruments de pointe/grands instruments pour la mesure d'échantillons complexes).

Ces milieux pourront s'appuyer sur des réseaux d'observatoires de la zone critique et la coopération internationale, en particulier avec nos partenaires des pays du Sud.

14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales

A l'interface surface continentale - hydrosystème, la dynamique des flux particulières, élémentaires et/ou des éléments associés aux particules est bien documentée pour les grands hydrosystèmes et certains hydrosystèmes élémentaires via la présence de SNO et de consortium (e.g., type Hybam) à l'échelle nationale et internationale. A l'interface surface continentale-atmosphère cette dynamique est souvent abordée de manière ponctuelle sur des écosystèmes singulier. De manière générale, les études dans les pays industrialisés sont relativement nombreuses mais nettement moindre pour les pays de la zone intertropicale.

Les perturbations climatiques (inondations, sécheresse, érosion...), et anthropiques croissantes (artificialisation des terres, agriculture, déforestation, mines) perturbent la dynamique et les cycles naturels de ces flux.

Parmi les composés d'intérêt; le carbone, les nutriments et les contaminants organiques et métalliques sont particulièrement affectés par ces perturbations anthropiques et climatiques croissantes et/ou abruptes.

Pour élaborer des bilans de masse aux micro, méso, et macro échelles, il est nécessaire de documenter de manière spatio temporelle et in situ ces dynamiques et flux.

Verrous et besoins : Sous les forçages anthropiques et climatiques, il est importants de re-évaluer la dynamique de ces flux élémentaires / particuliers aux interfaces sol - hydrosystèmes terrestres et atmosphère (dynamique érosive, flux, sources et puits) et le devenir des éléments (stabilité des composés, temps de résidence, changement de spéciation....) et leur impact sur les écosystèmes réceptacles (dégradation, toxicité....) qui régulent ces flux ou en sont tributaires pour leur maintien.

Il est également important de croiser les reconstitutions de flux issues des archives environnementales à celles des chroniques de flux sur les dernières décennies (et d'adapter les résolutions pour pouvoir comparer ces informations) pour pouvoir transposer ces chroniques sur des périodes longues.

Bien que certain éléments soient bien documentés, d'autres cruciaux tels que le carbone et une large gamme de nutriments et contaminants ne sont documentés que partiellement.

Un grand nombre d'étude documente les concentrations (niveaux de contamination, spéciation chimique et particulaires) mais peu d'entre elles documente leurs flux et dynamique spatio-temporelle.

De nombreuses études documentent les processus et ou mécanismes sur des systèmes modèles en laboratoire, ce qui est un prérequis pour approcher ces mécanismes dans des systèmes naturels complexe. Il est aujourd'hui nécessaire de croiser ces résultats avec des observations et études de terrain pour améliorer la compréhension de cycles et dynamique/flux élémentaires à différentes échelles et in situ.

Un besoin d'harmonisation des approches méthodologiques (stratégies de prélèvement et analyse) est également nécessaire pour générer des bases de données cohérentes.

Ces approches doivent prendre en compte des échelles variables (de la parcelle au bassin versant jusqu'à l'hydrosystème dans son ensemble) et temporelle (diurne, saisonnalité, pluriannuel) pour documenter les flux et processus (interconversion, séquestration, dynamique transitoire) à l'échelle de l'écosystème considéré.

19-Les échelles de temps dans les SIC

Un défi actuel dans la compréhension des SIC est d'apporter des contraintes chronologiques des différents phénomènes affectant celle-ci (formation et évolution des couvertures d'altération et sols ; par exemple). Parmi les méthodes existantes de nouveaux outils et combinaison d'outils géochronologiques commencent à être utilisées. On peut noter à court terme, le ^{14}C , les déséquilibres des séries U-Th, l'OSL (optically stimulated luminescence), l'ESR (Electron Spin Resonance (ESR) Spectroscopy) et les isotopes cosmogéniques (^{10}Be , ^{36}Cl , ^{26}Al). Sur du long terme (<million d'années), de nouveaux outils émergent ou se développent sur des phases supergènes, comme l'(U-Th)/He sur oxydes et hydroxydes de fer (hématite et goethite); l'ESR (Electron Paramagnetic Resonance) sur argile (e.g. kaolinite) ou Ar-Ar sur oxydes de Mn.

Verrous : l'ensemble de ces méthodes sont de plus en plus utilisées et se développent dans des laboratoires des sciences de la Terre français (cf. ReGEF). Le développement et le soutien aux laboratoires est indispensable pour faire émerger des méthodologies ou combinaison de méthodologies permettant de contraindre les processus hydro-bio-géochimiques et géomorphologiques. L'accès aux différents laboratoires rend les développements difficiles

Besoins : L'apport d'AAP plus ouvert sur le développement méthodologique de ses thématiques serait un plus pour développer cette thématique. Besoin de RH dans les laboratoires

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Mangroves à l'anthropocène : enjeux de gestion de socio-écosystèmes menacés face aux changements globaux
Nom(s) et prénom(s)	Michaud Emma, Arnaud Marie, Bousquet-Melou Anne, Cormier-Salem Marie-Christine, Cuny Philippe, Fromard François, Gardel Antoine, Gollety Claire, Gontharet Swanne, Longépée Esméralda, Marchand Cyril, Militon Cécile, Morel Valérie, Pascal Pierre-Yves, Robinet Tony, Sottolichio Aldo, Thouzeau Gérard
Adresse(s) mail	emma.michaud@univ-brest.fr ; m.arnaudd@gmail.com ; anne.bousquet-melou@imbe.fr ; marie.cormier@ird.fr ; philippe.cuny@univ-amu.fr ; francois.fromard@univ-tlse3.fr ; antoine.gardel@cnsr.fr ; claire.gollety@univ-mayotte.fr ; swanne.gontharet@locean.ipsl.fr ; esmeralda.longepee@univ-mayotte.fr ; cyril.marchand@unc.nc ; cecile.militon@univ-amu.fr ; valerie.morel@univ-artois.fr ; pierre-yves.pascal@univ-antilles.fr ; tony.robinet@mnhn.fr ; aldo.sottolichio@u-bordeaux.fr ; Gerard.Thouzeau@univ-brest.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	X
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	X
5-Des outils aux données et aux connaissances	X
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	X
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	X

10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	X
11-Les contaminants de la Zone Critique	X
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	X
13-Le continuum biotique/abiotique	X
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	X
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) : Enjeux de gestion des systèmes d'interface à l'heure de l'Anthropocène	X

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les forêts de mangroves occupent, entre terres et océans, près de 75 % de la zone côtière intertropicale. Depuis leur apparition, il y a 60 millions d'années, elles ont démontré leur grande capacité adaptative et de résilience aux contraintes naturelles fortes. La crise écologique que subit aujourd'hui la biosphère, d'une ampleur et d'une rapidité sans précédent, provoque des déséquilibres majeurs dans l'ensemble des écosystèmes, aussi bien terrestres que marins : érosion de la biodiversité, dérèglements fonctionnels, altération des ressources et des services écologiques. Dans ce contexte inédit, les écosystèmes « mangrove » sont parmi les plus fragilisés de la planète, car étroitement dépendants du niveau des océans, soumis à l'intensification des événements climatiques extrêmes, et reculant également sous l'effet des pressions anthropiques directes (urbanisation, aquaculture, agriculture). Si l'on considère que les changements globaux s'apparentent à l'ensemble des modifications de l'environnement d'origines naturelle et anthropique, directs et indirects, dont les conséquences s'expriment à l'échelle de planète, on estime aujourd'hui à 40% la perte de la surface des forêts de mangroves depuis 1980 sous l'effet de ces changements. L'écosystème « mangrove » est en très forte interaction avec les sociétés qui vivent dans et à sa proximité, formant ainsi des *socio-écosystèmes de mangroves* (SESM). Préserver, restaurer et gérer l'intégrité structurale et fonctionnelle des socio-écosystèmes de mangroves devient aujourd'hui une nécessité tant écologique que sociétale.

La communauté scientifique française travaillant sur les SESM cherche aujourd'hui à se structurer au sein d'un réseau thématique « Mangroves » INEE/INSU/INSHS. Son rôle sera de regrouper les scientifiques travaillant sur les mangroves de France et de l'étranger, pour favoriser l'interdisciplinarité élargie - sciences de l'environnement et science humaines et sociales - et bâtir une vision transversale des recherches dans le but d'aider à la gestion de la diversité des socio-écosystèmes de mangrove en bâtissant quatre axes de recherches disciplinaires et deux axes transversaux : Axe 1/Dynamique sédimentaire des littoraux à mangroves ; Axe 2/Biodiversité, Structure, fonctionnement et interactions au sein des écosystèmes de mangroves ; Axe 3/Source, stock et devenir du carbone et des éléments associés (nutriments, métaux et contaminants) ; Axe 4/Valeurs et valorisation du socio-écosystème de mangrove ; Axe 5/Indicateurs mangroves ; Axe 6/Actions de formation.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) : *Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud*

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- Niveaux de résilience et la capacité d'adaptation des socio-écosystèmes de mangroves. Quelles sont les dynamiques de réponses (écologique, sédimentaire, biogéochimique, sanitaire et sociale) des SESM aux changements globaux ?
- Caractériser la façon dont la diversité des socio-écosystèmes de mangroves devrait être prise en compte dans les choix de gestion.
- Co-construire des plans de gestion intégrant à la fois la prise en compte de la conservation des processus propres aux mangroves, les besoins et aspirations des communautés locales (ressources, biens et services) pour une gouvernance durable et équitable.
- Être capables de mettre en place un travail conjoint entre scientifiques, parties prenantes, usagers et gestionnaires.
- Prendre en compte les spécificités de chaque territoire.
- Coordonner les méthodologies "label bas carbone pour les mangroves". A ce stade, les méthodologies établies pour calculer des crédits carbone sur les mangroves françaises manquent de rigueur scientifique et/ou présentent de nombreuses incertitudes.

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- Réseau d'observation inter-mangroves sur des mangroves à géomorphologies contrastées
- Instrumentation haute fréquence spatiale et temporelle sur des sites pilotes.
- Expériences à grandes échelles sur les mangroves pour quantifier la réponse des mangroves à des changements globaux (réchauffement, augmentation de l'inondation, augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂, eutrophisation) et prendre en compte la forte variabilité à différentes échelles spatio-temporelles des flux de carbone et des éléments associés aux différentes interfaces.
- Garantir des accès financés aux plateformes expérimentales, type CEREEP.
- Fédération des communautés INEE, INSU et INSHS, en incluant l'IRD et les partenaires du Sud
- Amélioration des modèles de carbone régionaux, et globaux, par des mesures de terrain et expérimentales. Les mesures de terrain (type Eddy-covariance, afin d'intégrer la variabilité spatiale à l'échelle locale/régionale) et les modèles régionaux devront considérer les différents stades de développement de la mangrove et leurs emprises spatiales respectives afin d'établir des bilans carbone réalistes.
- Postes :
 - o Poste de chercheur « carbone bleu » / flux biogéochimiques / cycle du carbone
 - o Poste de chercheur biodiversité/conservation/gestion/mangroves
 - o Poste de chercheur Economie Mangroves / impacts des mécanismes financiers sur les dynamiques locales
 - o Postes de chercheur SHS / Mangroves
 - o Soutenir la montée en compétence des acteurs locaux et accompagner la capacité de recherche et de surveillance de ces écosystèmes côtiers

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

- Harmonisation et amélioration des protocoles d'étude et de suivi aux différentes échelles ;
- Mise en place de stations d'étude permettant de comprendre l'hétérogénéité fonctionnelle spatiale et temporelle de ces écosystèmes aux différentes échelles ;
- Programmation de campagnes conjointes de suivis de ces écosystèmes ;
- Mise en place d'ateliers de travail impliquant les différents acteurs de la société concernés permettant une synergie des actions.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

- **Défi Territoire du futur**

Interrogations sur :

- la pertinence des crédits carbone et les effets des politiques publiques sur les socio-écosystèmes de mangrove ;
- les indicateurs de santé des mangroves avec approche One Health et sur "well-being" des habitants des mangroves
- les trajectoires futures des territoires de mangrove à la fois durables, équitables et désirables en référence aux ODDs et à la CBD

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Variabilité hydrologique large-échelle et interactions aux interfaces continentales : ressource, risques, scénarios d'évolution
Nom(s) et prénom(s)	M2C (Nicolas Massei, Abderrahim Jardani, Matthieu Fournier , Julien Deloffre, Yoann Copard, Nicolas Lecoq, Raphaël Bunel, Imen Turki, Manuel Fossa, Sivarama Chidepudi, Luminita Danaila, Benoit Laignel, Benoît Nigon, Imad Janbain)
Adresse(s) mail	nicolas.massei@univ-rouen.fr abderrahim.jardani@univ-rouen.fr matthieu.fournier@univ-rouen.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	X
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	X
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	X
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	X
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	X
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X

21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Dans le contexte actuel de changements environnementaux et de dérèglement climatique semblant accélérer de manière bien plus intense qu'attendu, il est nécessaire de porter d'importants efforts pour estimer toujours mieux la sensibilité des hydrosystèmes (rivières, aquifères) à différentes typologies d'événements extrêmes susceptibles de survenir dans des contextes de plus en plus variés ou complexes (mélanges d'événements de forte intensité, de successions d'événements, de concomitance d'événements, d'événements extrêmes « basse fréquence »). Les situations hydrologiques problématiques dans ce cadre ne concernent pas uniquement les flux d'eau mais potentiellement aussi les phénomènes érosifs, qui participent du risque hydrologique mais aussi de la dégradation des terres arables. Toutes les interfaces hydrologiques sont sujettes à la problématique, mais nous relevons ici 2 cas de figure particuliers : les grands bassins et les zones d'interface continent-mer.

Bien que cette problématique ait été abordée un certain nombre de fois dans les exercices de prospective passés, il paraît indispensable de poursuivre les efforts sur ce sujet et d'aborder de manière plus directe encore la question des risques composites (compound risks) qui s'avère de plus en plus prégnante.

Dans le cas des grands bassins ou de la très large échelle (i.e. régionale ou plus), la superposition d'événements et les interactions non-linéaires de processus d'origine et échelles de temps caractéristiques différentes impliquent ces réponses hydrologiques complexes (hétérogénéité physiographique, géologique, climatique, d'occupation des sols) et les rendent difficilement prédictibles et interdépendantes.

Dans le cas des interfaces continent-mer, la conjonction de mécanismes très différents est évidente même à petite échelle (inondations résultant de la superposition d'événements pluvieux intenses avec des hauts niveaux de nappes et des surcôtes marines, salinisation suite à des étiages sévères et des coefficients de marée importants en contexte d'élévation du niveau marin...).

Nous insistons ici plus particulièrement sur des aspects complémentaires qui méritent d'être abordés de manière approfondie :

- la nécessité du développement de scénarios hors projections type CMIP pour évaluer la réponse des hydrosystèmes, leur sensibilité et leur vulnérabilité : les projections climatiques utilisées classiquement en entrée des modèles hydrologiques (que ce soit sous forme d'ensembles ou en sélectionnant certains membres) ne permettent pas forcément de représenter certaines situations hydroclimatiques particulières. Il faut donc, en parallèle de cette approche, développer des scénarios ou des hypothèses climatiques ou hydroclimatiques spécifiques qui pourront être testées. Différentes approches peuvent être utilisées ; certaines existent (par répétitions d'événements extrêmes successifs, par modification de l'amplitude de certains événements, par modification du

contenu spectral de chroniques hydrométéo existantes afin de décrire des comportements particuliers...), d'autres restent à imaginer.

- Mieux aborder la part de l'incertitude liée à la variabilité climatique naturelle, notamment basse fréquence (multidécennale mais aussi de plus court terme, e.g. multi-annuelle) dans les projections hydrologiques ou dans des « scénarisations » : les modèles climatiques ne reproduisent pas toujours bien la variabilité climatique « naturelle », et de toute façon la nature stochastique de cette variabilité provoque sa disparition dans les projections temporelles dès lors qu'elles sont utilisées sous forme d'ensemble. Pourtant, de très nombreux événements extrêmes (et dégâts associés) constatés dans les observations peuvent être liés à cette variabilité engendrant une dépendance statistique entre les phénomènes extrêmes sur un temps long.

- Compte-tenu de la complexité et de la diversité des phénomènes et processus à prendre en compte et de leurs interactions, les outils de l'IA nous semblent un renfort méthodologique extrêmement important à considérer pour la simulation et la prédiction des réponses hydrologiques dans des environnements complexes (e.g. interface terre-mer) et à grande échelle. Pour ce deuxième cas, la question est toujours posée du manque de données et de connaissances pour tous les processus à prendre en compte aux échelles nécessaires, mais aussi sur le coût de mise en œuvre de modèles efficaces à de telles échelles (moyens humains, données, mesures, équipements et temps de calcul...). Sans pour autant se substituer aux démarches physiques ou conceptuelles, l'apprentissage automatique ou l'apprentissage profond par réseaux de neurones peut constituer une alternative et un complément. Paradoxalement, ces méthodologies ont certainement le mérite de replacer d'autant plus les observations et les données, leur analyse et leur compréhension au cœur de la démarche, ainsi que l'expertise et la connaissance scientifique des objets et processus en jeu. L'interprétabilité des algorithmes d'IA et les approches hybrides (e.g. réseaux de neurones informés par la physique, intégration de connaissance « expert ») devraient contribuer à une meilleure intégration des méthodes d'apprentissage.

D'une manière générale, comme indiqué plus haut la démarche discutée ici peut contribuer à aborder efficacement la problématique des risques composites dont la compréhension et l'étude est cruciale en raison de leur implication pour les risques en cascade (environnementaux, industriels, sanitaires, économiques, et finalement sociaux induits).

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

La problématique exposée doit faire l'objet d'interactions avec les organismes opérateurs de la gestion des territoires, et les réflexions posées peuvent aussi s'appliquer au contexte des pays du Sud.

La réflexion autour de l'application des outils d'une IA « frugale », de la nécessité ou non d'exploiter des données massives, d'avoir recours à la connaissance

hydrologique expert ou à l'information par la physique doit contribuer à fournir des éléments de réponses aux questions de la recherche bas carbone et à la responsabilité environnementale. La réflexion autour de l'utilisation de l'IA n'est d'ailleurs pas spécifique aux sciences de l'eau mais bien transverse à tous les thèmes SIC et sciences de l'environnement.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- Quelle(s) démarche(s) méthodologique(s) employer pour mieux prendre en compte l'incertitude liée à la variabilité climatique « naturelle » pour estimer la sensibilité et la vulnérabilité de hydrosystèmes aux événements extrêmes ?
- Comment créer les scénarios climatiques ou hydrométéorologiques les plus pertinents, non disponibles dans les projections hydroclimatiques, pour tester la sensibilité et la vulnérabilité des hydrosystèmes à certains types d'événements extrêmes ? Quelles méthodes déployer ?
- Travailler davantage sur l'interprétabilité de l'IA appliquée à nos objets d'études : quelles méthodes d'IA, quelles nouvelles approches dans leur application aux objets des SIC ?
- Aller vers une IA « frugale » : quelles approches méthodologiques favoriser, comment les adapter à nos objets, le développement des approches hybrides (e.g. réseaux de neurones informés par la physique) peut-il aider à consommer moins de données ? L'objectif est ici de tendre vers d'avantage de sobriété énergétique (matériel/équipements à acheter et maintenir pour la mesure à long terme, coût en matière de stockage de données mais aussi de temps de calcul), mais aussi de pouvoir tirer parti de l'IA pour des problèmes complexes lorsque les données massives ne sont pas disponibles.
- Comment prendre en compte l'interdépendance des événements extrêmes sur de grandes échelles spatio-temporelles dans le continuum Terre-Mer ?

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- Pour les domaines d'interface continent/mer et pour les estuaires en particulier, la nécessité de mettre en place des synergies entre communautés « continentale » et « marine » avait été soulignée dans les dernières prospectives, mais à l'heure actuelle, il ne semble pas exister d'évolution notable à ce niveau et les communautés restent a priori plutôt cloisonnées (e.g. pour l'hydrologue, un estuaire reste un exutoire de bassin versant, et pour une

océanographe il s'agit d'un compartiment particulier, voire juste une condition aux limites, du domaine marin ou côtier). L'interface est généralement étudiée sous un angle de vue principal sans toujours s'entourer de tous les domaines nécessaires à une vision plus holistique de l'objet.

- D'un point de vue méthodologique, les approches multicateurs et multiéchelles (e.g. imagerie satellitaire, étude de processus au niveau de sites-observatoires) ainsi que des approches conjointes physiques ou par apprentissage automatique (IA) semblent particulièrement pertinentes.

- une interaction nécessaire avec la société civile, les organismes et opérateurs de la gestion de l'eau et des milieux aquatiques, pour par exemple définir et construire les scénarios revêtant un intérêt particulier en matière de risque et de disponibilité de la ressource en eau.

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Défi 1 Changement climatique, Défi 3 IA, Défi 4 Santé et Environnement, Défi 5 Territoires du futur

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Les interactions hôte-microbiote-environnement en écotoxicologie : <i>Dreissena</i> sp. comme modèle hôte
Nom(s) et prénom(s)	<i>Poupin Pascal, Giamberini Laure, Louis Fanny & Laetitia Minguez</i>
Adresse(s) mail	pascal.poupin@univ-lorraine.fr ; laure.giamberini@univ-lorraine.fr ; fanny.louis@univ-lorraine.fr ; laetitia.minguez@univ-lorraine.fr (LIEC, UMR 7360)

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2- Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3- Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4- Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5- Des outils aux données et aux connaissances	
6- La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7- Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9- Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10- Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11- Les contaminants de la Zone Critique	X
12- Le continuum Homme/Terre/Mer	
13- Le continuum biotique/abiotique	X
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15- L'éco-hydrologie	
16- Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17- Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18- L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	X
19- Les échelles de temps dans les SIC	
20- L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21- Énergie et transition énergétique dans les SIC	
22- Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

L'Homme entretient depuis toujours un rapport étroit avec l'eau. Cet élément est vital à sa survie (eau potable, élevage, irrigation des cultures, pêche) et à son bien-être (hygiène, loisirs). Les développements urbains et industriels de nos sociétés ont conduit à une diversification et à une intensification de l'usage de l'eau (eau domestique, eaux récréatives, production d'énergie, eaux industrielles). Cette multiplication des usages et la pression démographique croissante contribuent à polluer les écosystèmes aquatiques. La dégradation de la qualité de l'eau qui peut être d'origine physique (élévation de la température), chimique (molécules organiques et inorganiques) ou biologique (bactéries, virus, parasites) perturbe les conditions de vie des organismes et compromet les services écosystémiques rendus par les milieux aquatiques. Ces pollutions et les dysfonctionnements climatiques peuvent, par exemple, favoriser la croissance de microorganismes pathogènes et augmenter la sensibilité des organismes hôtes vis-à-vis des pathogènes.

En particulier, les écosystèmes d'eau douce, importants réservoirs de biodiversité, peuvent être menacés par la pollution et les changements climatiques. Depuis l'an 2000, la Directive Cadre européenne sur l'Eau impose aux pays de l'UE une reconquête de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques. Afin d'atteindre cet objectif, il est indispensable d'avoir une meilleure connaissance des milieux dulcicoles, via notamment des diagnostics de l'état de santé des organismes aquatiques. Différents outils sont disponibles, tels que l'utilisation d'organismes "sentinelles" ou bioindicateurs. Les bivalves dulcicoles *Dreissena* sp. (*Dreissena polymorpha*, *Dreissena bugensis*) font partie des organismes les plus couramment utilisés pour ce type d'approche. Ces bivalves filtrent de grandes quantités d'eau pour se nourrir et sont ainsi fortement exposés aux polluants et aux microorganismes. Cette exposition peut induire des altérations qui peuvent être observées au niveau de certains tissus comme les branchies ou la glande digestive. Ces facteurs de stress peuvent aussi perturber la stabilité du microbiote de ces tissus. La glande digestive est l'un des tissus les plus riches en microorganismes. Cette microflore comprend le microbiote du système digestif mais aussi des microorganismes pathogènes et des microorganismes opportunistes présents dans la colonne d'eau. En santé humaine, la relation entre différentes pathologies et la composition du microbiote est aujourd'hui un axe de recherche central. La prise de conscience au sujet d'une santé unique montre également les liens impondérables entre l'environnement et la santé. Des études sur certaines espèces « sentinelles » ont déjà révélé l'influence de l'environnement sur la composition du microbiote. Malgré l'importance des bivalves dulcicoles *Dreissena* sp. à la fois en bioévaluation mais aussi par rapport aux services écosystémiques rendus, les données sur les relations biotiques hôte-pathogène et hôte-microbiote manquent cruellement. Etabli à l'interface entre hôte et environnement, le microbiote symbiotique pourrait être un compartiment essentiel pour mieux comprendre l'acclimatation et l'adaptation de ces bivalves aux changements environnementaux. Toutefois la compréhension du rôle joué par le microbiote symbiotique dans la réponse des bivalves couramment utilisés en écotoxicologie est très parcellaire. Des approches holistiques et interdisciplinaires sont donc nécessaires pour démêler ces interactions complexes Bivalves-Microbiote-Environnement.

Plusieurs chercheurs du Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux (LIEC, Université de Lorraine, CNRS UMR 7360), développent ces recherches dans cette double thématique « Environnement et Santé » et militent pour une prise en compte nettement plus équilibrée en faveur de la partie « Environnementale » dans ce diptyque afin d'une part de mieux protéger les écosystèmes d'eau douce et d'autre part de comprendre comment leur dégradation peut être à l'origine de pathologies susceptibles d'affecter la Santé. Les recherches menées au LIEC participent à l'acquisition de nouvelles connaissances autour des interactions Hôte-Microbiote-Environnement, répondant aux défis « changements climatiques » et « Santé-Environnement » identifiés par le CNRS.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

-Pouvoir démêler le rôle de chaque entité de l'association Bivalve-Microbiote face aux perturbations environnementales

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

-Nouveaux outils (dont bioinformatiques) pour intégrer et démêler les différentes entités, interactions et fonctions au sein de l'holonbionte Bivalve-Microbiote.

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux
(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Adaptation des communautés bactériennes aux stress biotiques et abiotiques
Nom(s) et prénom(s)	CEBRON Aurélie, BAUDA Pascale, BEGUIRISTAIN Thierry, BILLARD Patrick, BLAUDEZ Damien, DANGER Michael, LEJEAN Marie, PAGNOUT Christophe, ZEGEYE Asfaw
Adresse(s) mail	aurelie.cebron@univ-lorraine.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	X
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les stress biotiques (bloom algaux, virus, espèces invasives...) et abiotiques (contaminants chimiques, changements globaux : CO₂, température, sécheresse...) conduisent à des modifications rapides de la diversité des communautés microbiennes dans l'environnement. Comme les microorganismes sont des acteurs clés du fonctionnement des écosystèmes, et qu'ils sont à la base des réseaux trophiques, il est essentiel de bien comprendre et de pouvoir prédire les effets de telles perturbations sur ces communautés. Des changements dans la composition des communautés microbiennes (remplacement de taxons, modification d'abondance relative, sélection de traits fonctionnels particuliers, etc.) doivent être mieux compris pour mener à des prédictions plus robustes de la trajectoire des écosystèmes en réponses à ces stress biotiques et abiotiques. Ces changements doivent être plus finement étudiés pour comprendre leur impact au niveau fonctionnel (érosion des fonctions microbiennes). Mais ils peuvent aussi être utilisés comme des indicateurs précoces d'un impact significatif des pressions anthropiques, ce qui devrait servir à l'avenir au développement d'outils diagnostic de l'état des écosystèmes. Des processus évolutifs courts chez les bactéries peuvent conduire à des adaptations rapides de ces microorganismes aux nouvelles conditions. Par exemple l'acquisition de gènes par transfert horizontal peut mener : i) à la dissémination de gènes d'antibio-résistance qu'il faut pouvoir suivre *in situ* dans le contexte de One-Health, mais aussi ii) en l'acquisition de gènes de résistance à des contaminants métalliques ou de biodégradation de contaminants organiques permettant à ces microorganismes de participer à l'autoépuration des milieux. Cependant les cinétiques *in natura* de dissémination et d'acquisition de telles fonctions sont encore largement inconnues, il faut développer de nouvelles approches pour répondre à ces questions en s'appuyant sur les outils de séquençage haut débit. De plus des mécanismes évolutifs moléculaires de réarrangement de gènes peuvent conduire à l'acquisition de nouvelles fonctions. En effet, il a été observé l'apparition de nouveaux gènes de dégradation de composés xénobiotiques après quelques décennies d'exposition de communautés bactériennes. Ces processus évolutifs peuvent être intéressants en remédiation mais avant de pouvoir tirer bénéfice de ces capacités métaboliques bactériennes, il faut renforcer nos recherches pour correctement caractériser leurs déterminants génétiques ainsi que les processus régulant leur expression.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

-Besoin RH : Bioinformaticien

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux
(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	
Nom(s) et prénom(s)	MASION Armand
Adresse(s) mail	masion@cerege.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	X
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	X
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Cette courte réflexion concerne principalement le thème #5 ("outils et données"), mais aussi les thèmes 11, 14 et 20 vu le recoupement partiel entre ces thèmes.

A propos du thème 5, celui-ci est large puisqu'il aborde l'intégralité de la chaîne de la mesure à la connaissance. L'aspect outil est évidemment essentiel puisqu'il conditionne le reste de la chaîne. En effet, une mesure réalisée dans des conditions inadaptées peut à des conclusions incomplètes, voire fausses. Si l'arsenal instrumental au sein de SIC est conséquent et bien exploité, il reste tout de même des progrès à faire. La cible principale pour ces évolutions sont les outils peu ou pas utilisés dans notre communauté, alors qu'ils recèlent de nombreuses potentialités.

Ne seront évoqués ici que quelques aspects/exemples, tirés principalement de la spectroscopie. Ainsi, les analyses UV-Vis et IRTF sont toujours peu nombreuses et restent en deça des possibilités de ces méthodes; d'autres outils comme la RMN sont quasi absents de l'instrumentation utilisée par la communauté SIC. Ceci est regrettable il s'agit de méthodes très accessibles en termes de coût et qui de larges possibilités de spéciation et de cartographies 2D et 3D, non seulement de la matière organique mais d'un large éventail de métaux. Bien sûr, les protocoles d'utilisation demandent dans la majorité des cas un certain ajustement méthodologique qui ne peut se faire sans l'aide d'experts, qu'ils soient dans SIC ou d'autres labos non-INSU. Les lignes de lumière synchrotron conçues en concertation avec des physiciens à l'écoute de nos besoins, reflètent parfaitement les bénéfices que l'on peut tirer d'une démarche pareille, et il s'agit dorénavant d'étendre ce type d'interactions positives à d'autres techniques qui sont moins restrictives en termes de disponibilités.

A ce sujet, concernant la matière organique en particulier, la complexité des systèmes que nous étudions exigent une caractérisation fine. Or, nos publications restent très génériques voire non informatives à ce sujet. Il faut donc emprunter la/les méthodologie(s) de nos collègues chimistes pour faire avancer les connaissances. Notre proximité avec l'INEE au sein peut être un atout. Mais une fois encore, ceci doit se faire en collaboration avec des experts.

Ceci est une part importante de la trans-disciplinarité que nous nous devons de satisfaire. Cette trans-disciplinarité fait partie des exigences de la quasi totalité des appels d'offres, mais dans les faits, elle est revendiquée de manière "molle" dans le proposal, et concrètement est le plus souvent absente dans la réalisation du projet.

Il est donc essentiel de favoriser et de multiplier les échanges/passerelles à ce sujet, non seulement dans la communauté SIC, mais aussi(et surtout!) au delà.

Concernant les données, elles sont appelées à se multiplier (imageries, expériences longue durée avec monitoring permanent). Bien sûr ceci doit être géré localement avant tout. Ceci dit, nos publications ne reprennent que très rarement ces données in extenso, alors qu'elles peuvent être utiles à d'autres. D'ailleurs l'UE en a fait un cheval de bataille en demandant un plan d'action pour les données générées pour chaque proposal. On se heurte rapidement à des difficultés puisque ces données ont vocation de figurer dans des bases de données ouvertes au plus grand nombre. On se rend compte rapidement que pour le format de ces bases, le concept de "taille unique" est inopérant. Ainsi, dans le domaine des nanomatériaux, la base dominante eNanoMapper est incapable de gérer des données issues d'expériences "environnementales" de type mésocosme. Ceci a donc nécessité la mise en place d'une base parallèle dédiée par nos soins.

Il s'agit donc de mettre en place une politique basée sur un compromis entre un certain dirigisme imposant un "service minimum" et une certaine souplesse permettant des solutions alternatives d'exploitation adaptées à une catégorie de contextes bien identifiés.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Fonctions microbiennes dans les écosystèmes anthropisés : apport des approches traits et des outils omiques
Nom(s) et prénom(s)	CEBRON Aurélie, BAUDA Pascale, BEGUIRISTAIN Thierry, BILLARD Patrick, BLAUDEZ Damien, DANGER Michael, LEJEAN Marie, PAGNOUT Christophe, ZEGEYE Asfaw
Adresse(s) mail	aurelie.cebron@univ-lorraine.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	X
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Dans l'environnement, les microorganismes sont exposés de manière chronique à une multitude de contaminants chimiques auxquels s'ajoutent l'ensemble des stress liés aux changements globaux. Bien que les communautés microbiennes puissent être affectées par ces stress multiples au niveau de leur diversité et fonctions, elles ont aussi une capacité de résilience bien plus grande que d'autres organismes dont les temps de génération sont plus longs et la redondance fonctionnelle existant entre souches microbiennes permet souvent de conserver, dans une certaine mesure, la plupart des fonctions. Pour évaluer cette redondance fonctionnelle et comprendre comment elle participe à la résilience de ces écosystèmes il est essentiel d'accélérer nos efforts de caractérisation des fonctions microbiennes *in situ*. En effet il est aujourd'hui bien connu que la contamination des milieux peut entraîner des modifications de la structure taxonomique des communautés mais les conséquences fonctionnelles sont moins bien connues. Pour faire ces liens entre la diversité taxonomique et fonctions, les approches basées sur les « traits fonctionnels » sont intéressantes à développer pour les microorganismes car elles pourraient servir au développement d'outils diagnostique. L'équipe EMMA du LIEC développe des approches basées sur les traits fonctionnels microbiens pour mettre en évidence les combinaisons de traits fonctionnels sélectionnés par diverses contaminations métalliques et/ou organiques et divers facteurs de stress dû aux changements globaux (CO₂, température, sécheresse, etc.). Notamment une base de données de traits fonctionnels bactériens « BactoTraits » a été développée (Cébron et al. 2021) et s'appuie sur les données de diversité taxonomique issues d'approches de métabarcoding. Cette démarche d'inférence fonctionnelle est moins coûteuse et bien moins complexe en termes d'analyse bioinformatique que la métagénomique ou la métatranscriptomique, qui restent toutefois les meilleures options pour une caractérisation fonctionnelle exhaustive. En effet, les approches omiques (transcriptomique, protéomique, métabolomique, etc.) sont des outils qui nous permettent aujourd'hui de décrire et comprendre la toxicité engendrée au niveau des cellules/organismes par des contaminants. Cependant, si ces approches sont bien rodées en ce qui concerne des microorganismes modèles, leur déploiement au niveau de l'écosystème sera un challenge à relever, qui nécessite des supports de bio-informaticiens dans un plus grand nombre de laboratoires. De plus, la multitude d'interactions biotiques et abiotiques rend très complexe l'interprétation de ces grands jeux de données omiques, nécessitant l'introduction de nouveaux outils en écologie/écotoxicologie microbienne, tel que l'intelligence artificielle. Par ailleurs, des efforts conséquents d'analyses post-génomiques (caractérisation fonctionnelle de gènes/protéines) devront également être menés sur une gamme de microorganismes modèles plus étendue afin d'évaluer la diversité des mécanismes sous-jacents aux réponses à des contaminants, et permettre notamment une meilleure assignation fonctionnelle des données omiques déployées sur des matrices complexes (sol, holobionte, etc.). Plus particulièrement, les mécanismes cellulaires mis en jeu en réponse aux contaminants émergents (métaux stratégiques tels que le lithium ou les terres rares, microplastiques, nanoparticules, PFAS, ...) ne sont que très peu connus et nécessiteront des actions ciblées. Enfin, l'effet cocktail de contaminants est difficile à appréhender et de nouvelles stratégies d'étude sont nécessaires afin de mieux caractériser l'impact réel d'une exposition à une combinaison de tels contaminants, qu'ils soient historiques ou émergents.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

-Besoin RH : Bioinformaticien

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Micropolluants et considération de la présence et des effets sur le biote de faibles doses de contaminants chimiques
Nom(s) et prénom(s)	Sophie Prud'homme, Laetitia Minguez, Elise Billoir, Fanny Louis
Adresse(s) mail	sophie.prud-homme@univ-lorraine.fr , fanny.louis@univ-lorraine.fr ; laetitia.minguez@univ-lorraine.fr , elise.billoir@univ-lorraine.fr (LIEC, UMR7360)

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2- Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3- Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4- Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'–enjeux d'–habitabilité du territoire	
5- Des outils aux données et aux connaissances	2
6- La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7- Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'–ADN environnemental	
9- Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10- Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11- Les contaminants de la Zone Critique	1
12- Le continuum Homme/Terre/Mer	
13- Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15- L'–éco-hydrologie	
16- Les SIC dans leurs interfaces avec l'–atmosphère	
17- Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18- L'–écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19- Les échelles de temps dans les SIC	
20- L'–interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	3
21- Énergie et transition énergétique dans les SIC	
22- Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Qu'elles soient urbaines, médicales, industrielles, agricoles ou de loisir, les activités humaines provoquent la contamination de l'environnement par une grande diversité de contaminants. Parmi ceux retrouvés dans les différents compartiments des écosystèmes, les **micropolluants** sont détectables dans l'environnement à des concentrations maximales de l'ordre du microgramme par litre. Bien que cette définition soit centrée sur les milieux aquatiques, des micropolluants sont également présents dans les autres compartiments de la Zone Critique, leur présence restant moins caractérisée. Ces concentrations sont bien souvent en deçà des concentrations à risque définies grâce aux études conduites pour élaborer les dossiers d'autorisation de mise sur le marché. Mais ces faibles concentrations sont souvent associées à une persistance/pseudo-persistance de ces contaminants, induisant une exposition chronique à une diversité de micropolluants des populations d'organismes peuplant les écosystèmes. Bien que généralement subléthales, les conséquences de cette exposition à long terme aux micropolluants sont susceptibles d'affecter les performances, la fitness et/ou la capacité des organismes à interagir avec leur environnement, pouvant *in fine* ainsi perturber le fonctionnement des écosystèmes. Les mécanismes d'action liés à la perturbation de la signalisation hormonale sont par exemple particulièrement décrits pour engendrer des effets à faible doses. Les approches moléculaires globales et non dirigées de type « omiques » permettent de mettre en évidence les mécanismes moléculaires sous-jacents, et révèlent souvent que les mécanismes engendrés par de faibles doses d'exposition sont différents des mécanismes engendrés à forte dose, et ne correspondent donc pas une simple atténuation des conséquences moléculaires engendrées. Il ne suffit ainsi pas d'extrapoler les effets décrits à forte dose pour anticiper les conséquences possibles d'une exposition à faible dose de micropolluants.

Identifier et comprendre **les effets et les conséquences** sur les organismes et les populations de la contamination chronique de la Zone Critique par une diversité de micropolluants est ainsi un enjeu important de l'écotoxicologie et la toxicologie de l'environnement. Les écotoxicologues du LIEC intègrent ainsi de faibles et très faibles doses de contaminants à leurs designs expérimentaux, du plus simple (microcosme) au plus complexe (mésocosme). Leurs efforts, et la compréhension fine des processus engendrés sont néanmoins limités par le manque de connaissances concernant la dynamique de ces polluants et leur devenir au sein de leurs dispositifs expérimentaux, de la Zone Critique (biodisponibilité) et des organismes (organotropisme), mais aussi dans la compréhension des phénomènes de bioaccumulation et transferts trophiques. Cela nécessite de faire évoluer les techniques d'analyse permettant caractériser la répartition et la dynamique des micropolluants au sein de la zone critique, dans des matrices plus ou moins complexes (eau de surface, sol, sédiment, biote) (Verrou 1), et ce de façon adaptable afin de pouvoir considérer les contaminants émergents en constante apparition dans la Zone Critique.

L'utilisation de gradients de doses dans les designs expérimentaux permet de favoriser l'inclusion de dose très faibles. Ce type de design présente également le grand intérêt de permettre une estimation des benchmark doses (dose provoquant un effet donné) pour les paramètres étudiés, permettant ainsi d'identifier les concentrations auxquelles les perturbations sont susceptibles de se produire, quel que soit l'échelle considérée (du processus moléculaire à l'écosystème). L'exploitation des données issues de ce type de design nécessite la modélisation des courbes dose-réponses, quel que soit le type d'effet mesuré et le type de tendance engendré. Tandis que de tels outils adaptés aux approches moléculaires omiques existent, l'analyse automatisée d'autres types de données émergentes en écotoxicologie reste limitée, freinant l'exploitation de ces données et ainsi l'avancée de la compréhension des mécanismes biotiques impliqués l'écotoxicité des micropolluants (Verrou 2).

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

1 – La nécessité de caractériser l'exposition des organismes aux micropolluants, que ce soit au sein des écosystèmes ou des dispositifs expérimentaux de laboratoire (microcosmes, mésocosmes) se heurte à la difficulté de trouver des laboratoires/plateformes capables d'un point de vue technique et de ressources humaines de quantifier avec une sensibilité suffisante les micropolluants organiques dans des matrices simples (eg : eau de surface) ou plus complexe (eg : sédiment, ressource trophique, biote).

2 - La généralisation des design expérimentaux intégrant des gradients de dose en écotoxicologie rend nécessaire la modélisation des réponses mesurées au long du gradient de dose pour toute une diversité de réponses et de types de données.

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

1 - L'inclusion des faibles concentrations dans les recherches en écotoxicologie nécessite la structuration d'une capacité nationale de quantification des molécules organiques dans des matrices simples et complexes (eg : sédiment, ressource trophique, biote), et ce y compris pour des contaminants émergents, ce qui implique une importante réactivité dans le développement du dosage de nouvelles molécules

2 - Développement d'outils d'analyse statistiques convivial permettant d'automatiser la modélisation des dose-réponse d'une diversité de paramètres biologiques (du moléculaire au populationnel) le long d'un gradient de dose. Ces outils devront prendre en compte la diversité de ces données, tant en termes de nature statistique des variables observées (variables quantitatives, semi-quantitatives, binaires) qu'en termes de forme de courbes dose-réponse observées (mono ou biphasiques).

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Défi 4 – Santé & environnement : la question de la contamination de l'environnement par des contaminants à faibles doses est également posée sur les populations humaines – les verrous concernant les outils & méthodologies d'analyse/interprétation de données en gradient de dose (y compris omiques) sont partagées.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Modélisation du transfert de pesticides à l'échelle de grands bassins versants
Nom(s) et prénom(s)	Vincent Thieu, Hélène Blanchoud, Marie Silvestre (FR3020 FIRE)
Adresse(s) mail	Vincent.thieu@sorbonne-universite.fr helene.blanchoud@upmc.fr marie.silvestre@sorbonne-universite.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	X
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	X
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

La modélisation du transfert des pesticides reste un sujet d'intérêt pour anticiper la contamination future de la ressource en eau. Le couplage de bases de données avec des modèles biogéochimiques, hydrologiques et hydrogéologiques a été développé pour modéliser dans un premier temps le transfert des nitrates en collaboration avec l'INRAe Mirecourt, le centre de géosciences de Mine Paristech et la FIRE. Pour les pesticides, la plus grande difficulté à l'échelle de grands bassins versants est l'estimation des usages phytosanitaires. Aujourd'hui, de nouvelles bases de données sont disponibles (au niveau national) et permettent de définir plus précisément la spatialisation des usages, mais au dépend de l'approche agronomique précédemment développée. Il s'agit maintenant d'adapter le couplage des modèles pour intégrer au mieux ces nouvelles données.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Ces actions de modélisation sont financées par les acteurs du territoire tels que les Agences de l'Eau de par leur intérêt pour établir l'état des lieux des masses d'eau continentales (et effectuer le rapportage au niveau européen).

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Un verrou technique réside dans la difficulté de coupler des modèles basés sur des technologies très différentes et ayant des temporalités et des ressources de développement hétérogènes.

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Les financements servent principalement à recruter en CDD des IR ou post docs. La pérennisation d'un poste CR CNRS serait un moyen d'assurer la continuité de cet axe thématique. De plus, la création d'un poste d'ingénieur de recherche en développement informatique permettrait d'améliorer et stabiliser les couplages des modèles mis en jeu. Par ailleurs, cet ingénieur travaillerait sur la valorisation des résultats de modélisation via le développement d'interfaces web et œuvrerait ainsi à une plus grande diffusion et ouverture des résultats de recherche auprès de la société (experts et grand public).

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Utilisation de capteurs et d'échantillonneurs passifs pour appréhender la contamination des milieux (aquatiques et atmosphériques)
Nom(s) et prénom(s)	Hélène Blanchoud, Aurélie Goutte, Elodie Guigon, Thomas Thiébault Jean-Marie Mouchel
Adresse(s) mail	Elodie.guigon@upmc.fr / Elodie.guigon@ephe.psl.eu

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	X
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	X
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	X
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	X
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les nouvelles approches métrologiques, et notamment les préleveurs passifs, permettent d'observer et d'évaluer la contamination du milieu par les micropolluants organiques à des niveaux de détection bien plus faibles que par simple échantillonnage direct. Ils donnent une image de la contamination moyenne sur la période d'échantillonnage, sont faciles d'utilisation et de faibles couts. Si les POCIS sont maintenant couramment utilisés en milieu aquatique pour les molécules hydrophiles, il existe d'autres supports permettant d'élargir la gamme de substances à rechercher (selon une échelle d'hydrophobicité). De même, des échantillonneurs atmosphériques développés par des équipes nord-américaines sont utilisés pour définir les niveaux de contamination de l'atmosphère en micropolluants organiques au sein de réseaux auxquels nous participons ([GAPS network](#), Earthwatch's Operation Healthy Air) à l'échelle mondiale ou de grandes villes. Ces préleveurs nécessitent encore pour certains d'être testés dans des conditions de variabilité de condition du milieu, d'autres d'être améliorés ou développés pour devenir des capteurs avec des temps de mesure courts ou mobiles. Ces dispositifs combinés à la microfluidique ouvrent des voies de recherche car ils sont un moyen d'avoir une approche moins statique (spatialement et temporellement) de la contamination du milieu de vie.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

1. Rechercher de nouvelles matrices supports et méthodes d'extraction adaptées
2. Adapter les dispositifs aux conditions de vie des organismes
3. Développer des systèmes transformant une grandeur physique observée en une grandeur utilisable de type signal électrique, miniaturisés pour être transportés (drones, microfluidique).

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

IR en chimie analytique

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Ces questions sont directement liées au défi santé – environnement

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Suivi eaux continentales par télédétection & changement climatique
Nom(s) et prénom(s)	RAMILLIEN Guillaume DARROZES José SEOANE Lucia
Adresse(s) mail	Guillaume.Ramillien@get.omp.eu Jose.Darrozes@get.omp.eu Lucia.Seoane@get.omp.eu

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	X
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

L'étude des eaux continentales est un domaine de recherche qui vise à comprendre et à prévoir les changements qui se produisent dans les grands réservoirs continentaux et sur de larges échelles spatio-temporelles allant des observations de terrain aux mesures satellites globales.

L'intérêt de cette prospective est de rassembler une large communauté de chercheurs spécialistes en acquisition/traitement et en modélisation des transferts d'eau entre les différents sous-compartiments continentaux afin de mieux comprendre le fonctionnement du cycle de l'eau et son évolution. L'observation systématique de notre environnement depuis l'espace représente aujourd'hui un outil incontournable pour fournir des diagnostics sur ces stocks d'eau.

Les missions géodésiques GRACE et GRACE-FO ont été conçues pour mesurer les variations du champ de gravité terrestre, ce qui permet de cartographier les variations temporelles des masses d'eau (atmosphère, océans, stocks continentaux). Ces missions utilisent une paire de satellites en orbite basse qui mesurent les variations de distance entre eux à l'aide de micro-ondes. Ces satellites sont les seuls à fournir les variations des eaux souterraines à grande échelle. Les eaux souterraines sont une ressource vitale pour de nombreuses régions du monde, mais elles sont souvent difficiles à mesurer directement. Cela permet de surveiller les tendances à long terme et de détecter les variations saisonnières mais aussi anthropiques, ce qui est essentiel pour une gestion durable de cette ressource.

En ce qui concerne les niveaux des lacs et des rivières, les altimètres radars sont utilisés pour mesurer les variations de hauteur des surfaces en eau. En combinant ces mesures avec des données de positionnement précises, il est possible de déterminer la hauteur de l'eau avec une grande précision. Les satellites altimétriques fournissent ainsi des informations sur l'évolution des niveaux des lacs, des rivières et des zones côtières, ce qui est important pour la gestion des ressources en eau et la prévention des inondations. La mission SWOT est une mission qui vise à améliorer ces mesures. Contrairement aux altimètres radars classiques, qui mesurent la hauteur de l'eau le long d'une seule trace au-dessus de la surface, SWOT utilisera une technique d'imagerie en "fauchée" spatiale pour obtenir une couverture plus complète. Cela permet de mesurer les variations de hauteur de l'eau sur une plus grande surface, ce qui est particulièrement utile pour les grands cours d'eau et les lacs.

Enfin, la famille des satellites Sentinel fournit des mesures des images radars de la surface terrestre sur plusieurs canaux. Ces satellites sont utilisés pour surveiller divers aspects de l'environnement, tels que la végétation, les changements de terrain et les mouvements de glace.

Enfin, les six nanosatellites CYGNSS sont dédiés à la détection des ouragans. Cette constellation utilise des signaux GPS réfléchis par la surface de l'océan pour mesurer les vents à la surface de l'eau. En mesurant les variations de ces vents, les satellites CYGNSS peuvent fournir des informations précieuses sur l'intensité et la trajectoire des ouragans dans la bande inter-tropicale, ce qui est essentiel pour les prévisions météorologiques et la gestion des catastrophes.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

1. Hydrologie : étude scientifique des eaux continentales, y compris leur distribution, leur mouvement et leur qualité. Cela comprend l'analyse des précipitations, de l'évaporation, de l'infiltration, de l'écoulement des rivières et des nappes souterraines. Le monitoring et l'acquisition depuis l'espace permet de réduire l'impact carbone et de tendre vers une recherche non polluante.

2. Changement climatique : Il a un impact significatif sur les ressources en eau continentale, en particulier dans les pays du sud - comme l'accentuation de la sécheresse au Sahel - mais depuis ces dernières années l'impact du changement climatique tend à se globaliser. Les modèles climatiques prévoient des variations dans les régimes de précipitations, les températures et les schémas d'évaporation, ce qui peut avoir des conséquences sur la disponibilité et la qualité de l'eau.

3. Gestion des ressources en eau continentale : L'utilisation durable des ressources en eau continentale est un enjeu majeur pour assurer leur disponibilité à long terme, en évitant la surexploitation des ressources en eau.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

1. Verrous financiers : L'étude des eaux continentales peut nécessiter des ressources financières importantes, notamment pour l'achat de gros équipements, la préparation des prochaines missions satellites, la collecte et le stockage des données et leur analyse. Les contraintes budgétaires peuvent donc limiter la capacité des chercheurs à mener des études approfondies sur les eaux continentales. Le choix d'utiliser des constellations de nanosatellites permet de réduire les coûts tout en améliorant le suivi spatio-temporel.

2. Verrous de connaissances : L'hydrologie est un domaine complexe qui nécessite une expertise dans plusieurs disciplines, telles que la chimie, la biologie et la géologie. Les lacunes dans les connaissances ou le manque de spécialistes dans certains domaines peuvent donc constituer un verrou pour l'étude des eaux continentales. Dans le cas des eaux souterraines, le manque de données globales aboutit à une mauvaise connaissance de ce réservoir primordial.

3. Verrous de collaboration : L'étude des eaux continentales nécessite souvent une collaboration entre différents acteurs, tels que les chercheurs, les gestionnaires des ressources en eau et les décideurs politiques. Le manque de collaboration ou de coordination entre ces acteurs peut limiter la capacité à mener des études approfondies et à prendre des décisions éclairées en matière de gestion des eaux continentales.

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

1. Financement des moyens : L'étude des eaux continentales nécessite des ressources financières pour l'achat d'équipements, assurer l'accès aux données satellites et développer la modélisation informatique.

2. Suivi à long terme : L'hydrologie spatiale nécessite un suivi à long terme pour comprendre les tendances et les changements dans la qualité de l'eau au fil du temps (continuité & pérennité des observations).

2. Modélisation : La modélisation informatique peut être utilisée pour simuler et prédire les processus hydrologiques complexes grâce à l'optimisation, la parallélisation des tâches et à l'IA.

3. Collaboration interdisciplinaire : L'étude des eaux continentales nécessite souvent une collaboration interdisciplinaire entre les scientifiques spécialisés dans différents domaines.

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

1. Définition des objets d'étude, e.g. le bassin amazonien, et des objectifs du projet, e.g. impact de El Niño sur les stocks d'eau en Amazonie.

2. Evaluation (a) des ressources disponibles : personnel et matériel, budget nécessaire, et (b) des contraintes et les possibilités (calendrier AO et stratégies financières).

3. Collecte des observations satellites idoines, des sorties de modèles, mesures indépendantes de terrain.

4. Analyse des données et modélisation. Validation. Valorisation des résultats.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

1. Gestion de l'eau : L'eau douce est une ressource limitée et vitale pour l'humanité. L'étude des eaux continentales permet de mieux comprendre la disponibilité de l'eau, les cycles hydrologiques et les besoins en eau des écosystèmes et des populations humaines avec des crises de plus en plus intenses et fréquentes.

2. Changement climatique : Le changement climatique a un impact significatif sur les eaux continentales. Les précipitations, les températures et les régimes de fonte des glaciers sont tous affectés par le changement climatique, ce qui a des conséquences sur les ressources en eau douce.

3. Gestion des risques naturels : Les eaux continentales sont souvent associées à des risques naturels tels que les inondations, les sécheresses et les glissements de terrain, crises migratoires et socio-économiques, e.g. agriculture.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Fonctionnement intégré des hydrosystèmes continentaux : complémentarité des approches de modélisation et d'observation au service de la ressource en eau
Nom(s) et prénom(s)	Ludovic Oudin, Vincent Thieu, Agnès Ducharne, Anne Jost, Gilles Billen, Josette Garnier, Danièle Valdès, Valérie Plagnes, Laurence Lestel, Pierpaolo Zuddas, Jean-Marie Mouchel
Adresse(s) mail	Ludovic.Oudin@upmc.fr , vincent.thieu@upmc.fr , Agnes.Ducharne@upmc.fr anne.jost@upmc.fr , gilles.billen@upmc.fr , josette.garnier@upmc.fr , daniele.valdes_lao@upmc.fr , valerie.plagnes@upmc.fr , laurence.lestel@upmc.fr , pierpaolo.zuddas@upmc.fr , jean-marie.mouchel@upmc.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	x
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	x
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	x
5-Des outils aux données et aux connaissances	x
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	x
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	x
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	x
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	x

13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	x
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	x
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	x
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

L'équipe Hydrosystèmes de l'UMR 7619 METIS poursuivra ses travaux sur la caractérisation des surfaces et interfaces continentales, dans une optique de compréhension des transferts d'eau, de matière et d'énergie, et de **quantification et protection de la ressource en eau** (d'un point de vue tant quantitatif que qualitatif).

Les **eaux souterraines** constituent l'essentiel de cette ressource et une gestion durable de celles-ci est indispensable au développement équitable de nos sociétés. L'équipe a acquis et continuera à développer une expérience des écoulements souterrains dans des milieux de propriétés diverses (alluvions, craie, karst, socle et milieux volcaniques). La recharge (naturelle sous différents climats mais aussi artificielle, actuelle et future) de ces aquifères est un des sujets stratégiques pour le futur qui fera l'objet d'études particulières. En effet, la quantité mais aussi la qualité de la recharge conditionnent le volume des prélèvements dans les aquifères. Sur l'observatoire de Saint-Martin-le Noeud (SNO Karst), l'acquisition de données va se poursuivre et des travaux sur la modélisation du transport réactif des pesticides dans la ZNS de la craie seront proposés sur SMLN en un premier temps, puis testés à l'échelle du bassin parisien.

Une des caractéristiques de l'équipe vient de ses compétences en **modélisation** quantitative et qualitative des flux de surface et souterrains d'eau, de carbone et de nutriments dans les hydrosystèmes, qui permettront une "fertilisation croisée" des outils existants (modèle pyNuts-Riverstrahler du fonctionnement biogéochimique des hydrosystèmes, modèles hydrologiques GR4J et ORCHIDEE, labélisé par l'INSU et modèles hydrogéologiques tels qu'Hydrus, CaWaQS ou Modflow), pour pouvoir aborder des problématiques nouvelles. La modélisation des transferts de chaleur pour décrire la température des cours d'eau est en projet pour pyNuts-Riverstrahler et a commencé dans ORCHIDEE (le couplage avec le modèle hydrogéologique CaWaQS de Mines Paris permettant de tenir compte des apports de chaleur par les nappes). Ces développements offrent le cadre pour une généralisation aux transferts de matière et permettent d'envisager des couplages renforcés entre ORCHIDEE, pyNuts et CaWaQs, en commençant par le cas d'école du bassin de la Seine (PIREN-Seine Phase 9) et des observatoires qui lui sont associés (e.g. plaine alluviale de la Bassée). Ces couplages, ainsi que ceux des modèles hydrodynamiques et atmosphériques de l'IPSL, sont essentiels pour modéliser de nombreux processus aux interfaces (nappes/rivières, zones humides, interactions surfaces continentales - atmosphère, interface estuarienne) et aborder les questions des rétroactions qui structurent désormais les études d'impact et d'adaptation à différentes échelles de temps et d'espace.

Enfin, l'équipe continuera de porter l'étude des **trajectoires**, à travers l'analyse des impacts anthropiques et du changement climatique sur les hydrosystèmes, qu'il s'agisse de l'impact des actions humaines passées et à venir (modification du paysage et de l'usage des sols, héritages des contaminations dans les parties terrestres, activités minières, imperméabilisation liée à l'urbanisation, irrigation) ou de la modélisation de scénarios prospectifs pour évaluer la résilience des hydrosystèmes et les possibilités d'adaptation au changement climatique.

Un enjeu fort dans ce cadre porte sur l'intégration des données dérivées **d'imagerie satellitaire** à haute résolution spatiale, qui offrent des perspectives très intéressantes pour la modélisation hydro(géo)logique et biogéochimique des hydro-écosystèmes, et pour la caractérisation de l'empreinte humaine sur les hydrosystèmes (urbanisation, irrigation, construction de retenue, etc.).

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Les ressources en eau se définissent par la disponibilité quantitative en eau, par sa qualité, mais aussi par les usages et les besoins de nombreux acteurs sociaux. A ce titre, c'est un excellent modèle de l'imbrication croissante entre l'environnement biophysique et les sociétés, dont la co-évolution est une des caractéristiques de l'Anthropocène.

L'étude des hydrosystèmes et des ressources en eau implique donc une grande interdisciplinarité, en associant les sciences « de la nature » largement représentées dans la communauté SIC, les sciences sociales (histoire, géographie, sociologie, anthropologie, sciences politiques et juridiques), mais aussi les sciences de l'ingénieur et des données (modélisation, IA, capteurs) et des acteurs de la société, parties prenantes de la gestion de l'eau. L'UMR METIS et son équipe Hydrosystèmes ont une grande expérience de telles collaborations interdisciplinaires, avec des gestionnaires de l'environnement (administrations nationale et régionales) et des industriels également concernés par l'environnement, en particulier dans le cadre du programme PIREN-Seine, de la ZA-Seine ou d'un projet Belmont sur la gestion de l'eau sous changement climatique.

Plusieurs projets sont aussi développés en collaboration forte avec les pays du Sud, en particulier plusieurs pays du Sahel (Tchad, Mauritanie, Niger, Burkina Faso) et Madagascar, avec des enjeux forts sur l'accès à la ressource en eau et l'exploitation durable de ces ressources. Le renforcement des capacités et compétences en hydrologie et hydrogéologie dans ces pays sera aussi au cœur d'une partie des activités de l'équipe via notre contribution aux enseignements dans ces pays, ainsi que par la formation par la recherche (doctorant.e.s du Sud en cotutelle). Le maintien de relations internationales ouvertes est essentiel dans ce cadre, notamment en ce qui concerne les visas des étudiants et des enseignants chercheurs africains.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)

- Couplages entre les modèles hydro(géo)logiques (e.g. ORCHIDEE qui décrit aussi le fonctionnement des sols et de la végétation) et les modèles de transfert de matière et de chaleur, à l'échelle des hydrosystèmes

- Caractérisation de l'évolution des hydrosystèmes (occupation des sols, usages) à partir d'observations dans le passé + travail de scénarisation pour le futur
- Analyse des dynamiques sociales qui peuvent sous-tendre les évolutions futures

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

- Renforcement des compétences en modélisation des hydrosystèmes (couplage pyNUTS/ORCHIDEE, intégration de données d'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale et temporelle, apports de l'IA)
- Développement des compétences autour du big data et de l'IA, pour décrire les forçages complexes des hydrosystèmes et leurs trajectoires, et pour mettre à disposition les données observées et simulées
- Renforcement des collaborations en sciences sociales et accès ouvert aux programmes de recherche interdisciplinaires (dont le PEPR One Water)
- Renforcement de l'attractivité des carrières de la recherche publique (chercheurs dès la thèse, ITA), en particulier en région parisienne

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

1. Changement climatique
2. Inégalités éducatives
3. Intelligence artificielle
4. Santé et environnement
5. Territoires du futur
6. Transition énergétique

Nos travaux répondent aux six grands défis sociétaux ci-dessus. Nos priorités sont de faire avancer les connaissances concernant le changement climatique (impacts et adaptation), la santé et l'environnement (pollution de l'eau, biodiversité des milieux aquatiques) et les territoires du futur (sous le prisme des bassins versants, impactés par le changement climatique, l'urbanisation, l'agriculture intensive, etc.). A des degrés moindres, ils répondent aussi aux questions de la transition énergétique (par le lien eau-énergie). Pour les défis 2 et 3, ils ne sont pas l'objet de nos recherches mais nous voulons développer l'usage de l'intelligence artificielle sur nos thématiques, et notre implication dans des collaborations éducatives avec le Sud vise à réduire les inégalités éducatives.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution
(facultatif)

Nom(s) et prénom(s)

Xiaoni Wang-Faivre

Adresse(s) mail

Xiaoni.wang@lsce.ipsl.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

- 1- Observations
- 2- Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constante
- 3- Positionnement stratégique de la communauté SIC x
- 4- Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire
- 5- Des outils aux données et aux connaissances x
- 6- La zone critique urbaine et péri-urbaine
- 7- Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires x
- 8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental
- 9- Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques
- 10- Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants x
- 11- Les contaminants de la Zone Critique
- 12- Le continuum Homme/Terre/Mer
- 13- Le continuum biotique/abiotique
- 14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales x
- 15- L'éco-hydrologie
- 16- Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère
- 17- Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne
- 18- L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC
- 19- Les échelles de temps dans les SIC
- 20- L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces x
- 21- Énergie et transition énergétique dans les SIC
- 22- Autre thème ? (à préciser) :

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

1) emulating physically-complex and computationally costly modules

The models nowadays incorporate complex physical/biogeo/chemical processes in order to better simulate land surfaces, driven by different land/vegetation/soil/meteorological conditions. Some modules could be costly for time and computational resources. AI-based emulator can be a powerful tool to represent complex and costly modules in an efficient way.

There are several challenges : 1) how to find the appropriate ML model (architecture or structure) in order to represent the physical module with reasonable accuracy for all land types and in all meteorological/climate conditions; 2) how to integrate such models efficiently into high-performance-computation infrastructures with heterogeneous resources ; 3) how to follow the evolution of physical models in a smart way by using AI models.

2) Hybrid modelization driven by data in order to improve the model accuracy

These days there are more high-quality observations available. These data offer valuable information to understand the capacity of physical model/processes. But physical models can have limitations compared to real data. There are classical data assimilation methods or ML-based parameter optimization which can adjust model parameters, in order to better fit the model to data.

A hybrid-model approach driven by data could be another way for SIC community. This can be useful for example for problems that the physical modelisation has limitation to well represent unknown processes, which however can be estimated by statistical approach. Such physical-AI-hybrid model may approach better to the observations.

3) Develop modules/tools to allow ensemble simulations in land surface model such as orchidee

Ensemble simulations by using different models or parameters is important to understand the strength and the constraints of highly-variable processes, which are difficult to represent in modelisation. This is the case of simulating evaporation in ORCHIDEE for example.

The development of ensemble functionality will help to quantify model uncertainties, and the aggregation of different models would improve the model accuracy.

4) incorporating spatial dependence and/or fine-scale processes into subgrid modelisation

For most land surface models, the simulations are calculated independently in each grid, especially when the simulation is not coupled with an atmospheric model. But there are some specific cases where the spatial dependence is an

important factor to physical processes. This is the case when simulating water routing from mountains and rivers to the basins, or in permafrost and wetlands, or even the simulation of soil microbial effects to biomass estimation.

There are several important challenges here. a) Often such physical modelisation is realized in a much finer spatial scale than the subgrid level, thus very costly in computation. b) To incorporate some fine-scale processes into the subgrid simulation is a challenge for mathematical formulation.

Statistical based methods could be promising to emulate the fine-scale processes and connect them into subgrid representations. There are classical statistical methods based on Gaussian processes, as well as recent deep-learning based ones (such as encoder-decoder for example), that we could implement.

5) Development of data processing tool in order to facilitate the mentioned works

The above works on modelisation and validation need large amount of data from remote sensing (Copernicus for example) or empirical models, and can be in global, regional or in situ scales.

The processing work can be heavy and complex due to fine spatial resolutions, different observational technologies and different data formats etc. Data also need to be processed to fit with community needs (regridding, transformation etc). These processings could be unified into one tool finally, in order to realize the data management in a coherent way.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

This work is interdisciplinary, by combining physics, mathematics, programming, and computing technologies. It is expected to bring improvements to land surface modelisation in critical zones (flooding, permafrost, wetland etc) as well as in global scale. New module developments by deploying the cutting-edge technologies would improve the model performance, expand the model flexibility, and reduce needed computing resources.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des perspectives (si adapté) :

Quels verrous ?

Some points already mentioned in the section 2.

Quels besoins ?

We would need for example researchers to carry out the future hydrology-related work, research engineer for the ensemble or AI-related studies and developments, and some PHD students and interns to carry out specific research tasks and data processing.

We need to set up a platform of collaboration in order to have more internal and external communications with mathematicians/physicians.

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

We will firstly realize the emulator work and its integration into ORCHIDEE . An ongoing work is to emulate the canopy radiative transfer model in orchidee. This could be expanded to other modules according to needs.

By choosing an appropriate physical module, we would study the utility of hybrid modelisation driven by data and AI.

The contributions of newly recruited colleagues will be important to the third and fourth points in section 2.

The fifth point in section 2 will be an ongoing and lasting task.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, **si adapté**) :

Some points mentioned in section 3.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Vers une meilleure intégration des composantes aquatiques au sein du continuum Homme-Terre-Mer
Nom(s) et prénom(s)	Vincent Thieu, Marie Silvestre, Goulven Laruelle, Antoine Casquin, Mélanie Raimonet, Josette Garnier
Adresse(s) mail	vincent.thieu@sorbonne-universite.fr , marie.silvestre@sorbonne-universite.fr, Goulven.Gildas.Laruelle@ulb.ac.be, a.casquin@groupe-esa.com, melanie.raimonet@univ-brest.fr, josette.garnier@sorbonne-universite.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	X
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	X
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	X
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

L'appréhension territoriale des continuums Homme-Terre-Mer (HTM) est rendue complexe par la diversité et la singularité des socio-écosystèmes qui s'interconnectent dans le temps et dans l'espace. Face aux changements globaux, il est urgent de parvenir à décrire le fonctionnement de ces systèmes, pouvoir évaluer leurs résiliences et les possibilités d'adaptation ou d'atténuation. Les outils de modélisation, indissociables des réseaux d'observation, sont capables de répondre en partie à ce challenge, néanmoins leurs complexités individuelles pénalisent lourdement les possibilités de couplage, si bien qu'il n'existe pas aujourd'hui d'outil de gouvernance intégrée sur le continuum HTM disposant d'une généralité suffisante pour satisfaire à une évaluation d'emprise nationale.

En effet, la modélisation des surfaces et interfaces continentales, bien qu'en constante évolution, reste encore très compartimentée. À l'amont, beaucoup d'efforts ont porté sur l'intégration des pressions terrestres agricoles (principal levier d'action pour les gestionnaires) et la modélisation des transferts sol-eau. Plus en aval, l'endiguement massif et récent des grands fleuves par des barrages-réservoirs hydroélectriques a profondément bouleversé le fonctionnement biogéochimique des hydrosystèmes dans leur ensemble. Plus généralement, la place des écosystèmes aquatiques a été révisée pour apparaître aujourd'hui comme des composantes actives des budgets de carbone et nutriments à l'échelle planétaire. Enfin, la complexité de certains systèmes comme les estuaires (pourtant d'importance majeure sur le continuum) pénalise l'intégration de ces interfaces et apparaissent comme des ruptures pour l'estimation des flux de nutriments exportés vers les zones marines côtières, ou encore pour les bilans de gaz à effet de serre (GES).

Les travaux que nous menons à l'UMR METIS, en collaboration avec la FIRE, l'Université Libre de Bruxelles, L'École des Mines de Paris ainsi que le LEMAR et l'IFREMER (cadre des projets [nuts-STeauRY](#) OFB, ANR MOQQA, PIREN-Seine et Seine-Aval, etc.) proposent le déploiement inédit, à des échelles territoriales allant du bassin versant à la France entière, d'une suite de modèles éprouvés représentant la cascade des nutriments et du carbone depuis les pratiques agricoles, les sols, le transfert dans les hydrosystèmes en incluant les estuaires, jusqu'à la zone côtière. Ces outils offrent (de par leur formalisme) une emprise suffisante (identification des pressions et des leviers potentiels) pour pouvoir dialoguer avec les gestionnaires et co-construire des prospectives d'adaptation, d'atténuation, et de transformation face aux changements globaux.

Sont repris ci-après des éléments de réflexions transverses et des opportunités qui nous paraissent essentiels pour progresser vers une modélisation plus intégrative des flux d'eau et de matières dans les parties aquatiques des continuums HTM.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) : *Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud*

- **Intégration des annexes hydrauliques de type barrages – réservoirs dans les chaînes de modélisation terre-mer** : Le long du continuum aquatique, les barrages-réservoirs endiguent la quasi-majorité des grands fleuves du monde. Leurs métabolismes consomment, éliminent et stockent de façon accrue du carbone et des nutriments, et peuvent également apparaître, selon leur âge, leur latitude et les conditions climatiques, comme des hot-spots d'émissions de gaz à effet de serre (GES) en particulier le méthane (CH₄) et le dioxyde de carbone (CO₂). Ces réacteurs biogéochimiques complexes intègrent une variété de processus biologiques, chimiques et hydrologiques étroitement liés, caractérisés par des temps de réaction allant de quelques heures (cycle nyctéméral du phytoplancton, gestion hydrique) à plusieurs mois

(saisonnalité de l'activité biologique) voir plusieurs années pour la décomposition des matières organiques initialement envoyées. Les modèles biogéochimiques s'appuyant sur une représentation mécaniste des processus aquatiques se révèlent extrêmement précieux pour mieux comprendre et quantifier le fonctionnement de ces réacteurs (modèle BarMan, incluant RIVE développé à l'UMR METIS). Ces modèles ne font néanmoins pas l'objet d'un couplage intégré avec les outils de modélisation fluviale.

- **Mieux contraindre les connectivités latérales et en particulier les apports de matières organiques** par les milieux humides et la ripisylve, leurs compositions et leur biodégradabilité dans le réseau hydrographique. En effet, la caractérisation des transferts latéraux, intégrant la connectivité hydrologique des parties terrestres drainées ou semi-terrestres comme les zones humides, mais également les interfaces nappe-rivière, constitue un objectif majeur pour identifier et modéliser les hotspots de rétention, production et transformation du carbone, des nutriments et des microcontaminants à l'échelle des paysages.
- **Renforcer le couplage des modélisations fluvio-estuariennes** : Nous prendrons ici l'exemple du couplage entre les modèles C-GEM et pyNuts-RIVERSTRAHLER déjà réalisé avec succès dans le cadre d'une application au bassin de la Seine et dont le déploiement à l'échelle de la façade Atlantique française est en cours de finalisation. Ce couplage reste, à notre connaissance unique par le caractère mécaniste et générique des deux modèles déployés. La calibration requise pour contraindre le paramétrage générique du module biogéochimique de C-GEM (qui comprend des paramètres tels que les paramètres photosynthétiques, le taux de dégradation de la matière organique, les taux de nitrification et dénitrification...), ainsi que de son module hydrodynamique (qui simule la propagation de l'énergie de marée le long de l'estuaire ou la déposition et le transport des matières en suspension) pourrait bénéficier des réseaux d'observations multiparamètres mis en place sur des secteurs avals (e.g. projet PHRESQUES, MAGEST, SYVEL, CPER GLAZ, etc.). L'utilisation de cette chaîne de modélisation doit également permettre à moyen terme de mieux contraindre la quantification des émissions aquatiques de GES (CO₂, CH₄, N₂O) sur l'ensemble du continuum terre-mer en incluant explicitement les zones de mélanges estuariens et en capturant leur dynamique spatio-temporelle complexe.
- **Nouvelles synergies entre modélisation biogéochimique, observation *in-situ* et télédétection spatiales** : les techniques de télédétection permettent d'acquérir des informations spatio-temporelles riches d'intérêts pour l'étude des systèmes aquatiques. Néanmoins la résolution spatiale souvent trop faible des capteurs satellitaires (MODIS, MERIS, etc.) a longtemps cantonné leur utilisation au domaine marin (ou des très grands fleuves, lacs et réservoirs). Le lancement des satellites Sentinel-2A et 2B (2015, 2017) embarquant le capteur MSI (Multi-Spectral Instrument) constitue un progrès scientifique considérable pour surveiller certains paramètres environnementaux à haute résolution spatiale (~10 m-60 m). Ce raffinement rend l'utilisation de l'imagerie satellitaire compatible avec l'échelle d'étude des barrages-réservoirs. Les travaux sur « la couleur des eaux continentales » du pôle Theia (<https://www.theia-land.fr>), les projets OBS2CO (CNES, 2018-2020) ou TELQUEL (OFB, dédié au suivi de la qualité des eaux lacustres) offrent ainsi un nouvel éventail de données (en production, ou en prototypage) dont le potentiel reste encore peu exploité en recherche pour l'amélioration des modèles biogéochimiques capables de quantifier les métabolismes aquatiques et les émissions de GES associées.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives:

Quels verrous ? Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)

1. Cloisonnement disciplinaire - faible niveau d'interdisciplinarité et de collaborations
2. Niveaux de complexité des modèles SIC, prévenant les possibilités de couplages - Accès aux codes et aux simulations de références.
3. Manque de recul sur certaines interfaces clés (hotspot) : zones ripariennes, bassin de drainage, interface nappe-rivière. Mieux quantifier les transformations intersystèmes / intercompartiments, et pouvoir rendre compte des hétérogénéités et/ou discontinuités au sein des continuums terrestre-aquatique (ex : rivière intermittente, etc.)
4. Possibilité pour les modèles SIC de prendre en compte des impacts de type ruptures (vs. adaptation) sous climat changeant
5. prise en compte et propagation des incertitudes le long de la chaîne de modélisation.

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

1. Assurer une continuité spatiale de la modélisation incluant la connectivité latérale et une approche bijective des continuums HTM (à différentes échelles, etc.), ainsi qu'une continuité temporelle requise pour étudier les héritages, et la résilience voire les points de bascule de certains compartiments,
2. Améliorer l'accessibilité des données produites incluant d'une part les observations in-situ (SNO etc.) mais également les simulations de référence produites par les modèles existants. Seule cette ouverture garantira un accès aux forçages (conditions limites) requis pour établir les possibilités de couplages entre les modèles existants.
3. Prioriser l'effort requis pour interfacier les modèles existants dans la communauté SIC, et leur permettre de produire des simulations couplées, intégratives et limitant les effets de bord inhérents au découpage par compartiments au sein du continuum HTM.
4. Analyser la capacité de résilience des modèles SIC pour appréhender les possibilités d'adaptation aux changements globaux, mais aussi pour rendre compte des ruptures ou des changements drastiques dans les socio-écosystèmes
5. Généralisation et homogénéisation des pratiques et métriques utilisées pour quantifier les incertitudes associées aux sorties des différents modèles.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

La présente contribution s'aligne sur 4 des 6 grands défis sociétaux du CNRS.

En premier lieu, la « *santé et l'environnement* » puisque le panel des outils de modélisation aujourd'hui mobilisés pour l'étude du continuum HTM traitent de façon opérationnelle des problématiques incluant la caractérisation des flux biogéochimiques, de macro- et micropolluants, de contaminants (ex.: pesticides, plastiques, PFAS, etc.), de matières organiques, et d'émissions de GES. Ces outils visent également à représenter les interactions entre homme (société) et milieu, sous le prisme de l'impact des activités humaines sur les sous-compartiments du continuum terre-mer, avec une dimension territoriale et prospective forte (*défi n°5 Territoires du futur*). Enfin, certaines composantes du continuum « aquatique » (objet de la proposition) se rattachent aux problématiques d'accès à la ressource en eau comme bien commun, incluant l'analyse de solutions d'adaptation au *changement climatique* (*défi n°1*), mais également le recours des aménagements de type barrage-réservoir pour répondre au besoin d'irrigation et de *production d'énergie* (*défi n° 6*).

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Stability of environmental DNA as a biomarker
Nom(s) et prénom(s)	JELAVIĆ Stanislav, GIGUET-COVEX Charline, GIELLY Ludovic, LANSON Bruno
Adresse(s) mail	stanislav.jelavic@univ-grenoble-alpes.fr; charline.Giguette-Covex@univ-smb.fr; ludovic.gielly@univ-grenoble-alpes.fr; bruno.lanson@univ-grenoble-alpes.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	x
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	x
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	x
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	x
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Environmental DNA (eDNA) is a relatively new and powerful tool used for monitoring of modern biodiversity, reconstruction of paleoenvironments or evolutionary inferences; however, the knowledge about the stability of DNA in various matrices such as sediments, water, air, snow (etc.) is fundamentally lacking making it still an unreliable biomarker prone to false negative bias and a very expensive one because of the number of samples that need to be screened in search of the positive result. To resolve these drawbacks, we need to correlate the matrix composition (both mineral and organic) with the presence or absence of eDNA (top-down approach) and elucidate the molecular basis of DNA stability in different matrices (bottom-up approach).

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

The question of the stability of eDNA is at the core of many scientific questions such as understanding the early evolution of life through transformative horizontal gene transfer, elucidating the response of species and paleoenvironments to climate change, the efforts to provide a genomic view into the evolution of species (including early hominin evolution in hot and humid climates) and to track emerging diseases such as viruses and bacteria in urban and periurban environments. Researchers at CNRS were pioneers in establishing the molecular basis for the analysis of environmental DNA and often led the efforts in tackling most of the above mentioned questions. CNRS has a unique advantage to deal with the problem of the eDNA stability but it needs to merge this vast knowledge shared between various Institutes and Sections to be able to push the search for eDNA beyond a stochastic endeavor and make eDNA a reliable, quantitative biomarker.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Communication across disciplines (mineralogy – geology – (molecular) biology – archeology – infectious diseases). Access to samples due to small amounts or priority issues. Dedicated instrumentation for matrix analysis (soils, sediments, aerosol...).

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Lack of platform for facilitated discussion among researchers from different backgrounds and skillsets. Dedicated, commonly funded laboratory for matrix analysis.

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

Platform/meeting/conference for researchers using eDNA in various disciplines to establish the connection, incite discussion, and introduce expertise. Financial support for instrumentation and running costs of dedicated laboratory for matrix analysis.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Making eDNA a reliable biomarker will contribute to efforts raised in two challenges: 1. Climate Change and 2. Health and Environment. Learning from the past responses to climate change inferred from biodiversity variations established through the analysis of eDNA, we can anticipate and prepare better for the future challenges we will certainly face. This includes, to name a few, the migration of invasive and endangered species, response of the global carbon cycle to sea level and temperature variations, changes in agricultural microbiome that has direct influence on food sources and environmental management and monitoring the spread and dangers from emerging diseases triggered by the changing climate and environment.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Des données aux connaissances
Nom(s) et prénom(s)	Riotte Jean, Oliva Priscia
Adresse(s) mail	

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	oui
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	oui
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	oui
5-Des outils aux données et aux connaissances	oui
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	oui
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	oui
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	oui
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	oui
13-Le continuum biotique/abiotique	oui
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	oui
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	oui
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	oui
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

La transformation de données à connaissance dans l'approche zone critique nécessite l'élaboration, de la part d'une communauté travaillant sur un écosystème, d'une représentation élaborée du fonctionnement de ce dernier. Représentation pluridisciplinaire, qui intègre la diversité des données acquises sur un système. Il semble essentiel que cette communauté s'interroge sur la façon de passer d'une somme de données acquises sur divers compartiments, de séries temporelles, de flux, de cinétiques différentes, d'hétérogénéité, à cette représentation élaborée. Comment intégrer les processus « longs » comme la pédogenèse, la géodynamique dans cette représentation ? Comment prendre en compte le cycle et les stocks de nutriments (autre que le carbone) dans la biomasse (épigée et souterraine) ?

Ces questions sont en lien direct avec les SNO SIC qui acquièrent des données de diverses natures sur des écosystèmes, mais pour un nombre limité de disciplines. Hors, une telle représentation, impliquant la connaissance du milieu physique, des stocks utiles à la vie, des forçages anthropiques ou humains, est essentielle pour interpréter des tendances à long terme. La perspective temporelle longue, au-delà de la durée d'observation est également essentielle. Elle doit mobiliser une communauté plus large que celle actuellement investie sur les SNOs.

Cette communauté pluridisciplinaire doit permettre, pour les SNOs, l'élaboration d'une représentation élaborée des systèmes, impliquant pour chaque discipline d'intégrer les avancées, les interprétations, les caractérisations, des autres disciplines. De notre expérience, il existe peu de sites ou l'équipe porteuse a produit une telle réflexion. Il y a sans doute un cadre méthodologique à établir et à diffuser auprès de la communauté, via l'IR OZCAR et au moins partiellement guidé par l'infrastructure européenne eLTER. Partiellement, car les moyens mis actuellement dans l'observation SIC nationale ne permet pas, loin s'en faut, d'approcher les standards européens en termes de standards d'observation.

Une discipline essentielle pour intégrer cette somme de connaissances et qui peut permettre de cerner les processus principaux responsables de l'évolution de l'état des écosystèmes est la modélisation. Cette communauté travaille encore très peu avec les SNO, à l'exception de la modélisation hydrologique mais cette dernière ne rend que peu ou pas compte des transferts de matière. Il serait souhaitable de bâtir une communauté forte en modélisation capable, sans doute avec de l'AI, d'intégrer l'hétérogénéité et/ou l'architecture des milieux.

Quelques axes de recherche à développer, ou redécouvrir :

- la zone critique profonde, qui est une ressource en eau pour l'homme mais potentiellement aussi une ressource en nutriments pour activité biologique et en particulier les plantes
- Quels liens entre le paysage (dimension humaine forte) et fonctionnement biogéochimique de la zone critique ?
- Les échelles de temps, la datation des processus, des phases, la quantification des temps de résidence dans la zone critique sont sous-étudiés. Ces informations chronométriques fournissent cependant des informations précieuses sur les évolutions possibles des compartiments et des ressources. Certains outils liés à la datation ont disparu du paysage national ; par exemple la mesure du tritium à bas bruit (datation de temps de résidence de l'eau dans les aquifères à l'échelle humaine), la méthode ^3He -tritium.

Le contenu de cette proposition s'inscrit dans une vision actualisée du « continuum » observation-calcul de flux eau/matière/énergie-identification des processus-modélisation mis en avant dans les visions stratégiques SIC il y a quelques années. Il est nécessaire revenir à ce continuum, en intégrant

de nouveaux outils tels que la génomique, et en y intégrant également l'activité humaine comme un compartiment ou une thématique à part entière. Peut-être s'inspirer de la notion de métabolisme d'un écosystème (qui existe en agronomie), concept de l'holobionte ?

Comment enseigner cette vision intégrative du fonctionnement des surfaces continentales, en intégrant les sciences sociales mais en faisant également adhérer les sciences sociales à l'idée que le milieu physique, biotique et abiotique, sont déterminants pour comprendre la trajectoire des écosystèmes ?

Ressources humaines : cette vision intégrative de l'étude de la zone critique nécessite de renforcer, ou rétablir de nombreux savoir-faire techniques et donc une politique de création de postes IT volontariste de la part de l'INSU = l'interdisciplinarité du chercheur ne peut être limitée à ses compétences techniques, le rôle des IT dans l'approche interdisciplinaire est essentiel. La multiplicité d'outils implique une multiplicité de savoirs techniques de plus en plus pointus et donc des personnels techniques spécialisés mais pleinement intégrés dans la communauté zone critique.

Enfin, l'approche zone critique implique de l'interdisciplinarité dès la formation des jeunes chercheurs, c'est-à-dire le doctorat. Le format actuel de 36 mois ne permet pas de s'approprier une discipline secondaire, ni même de l'aborder : il serait opportun de proposer des bourses de thèse de 4-5 ans pour les thèses pluridisciplinaires.

Cette contribution est transverse à de nombreux thèmes de la prospective mais il nous semble que cette dernière devrait proposer, d'entrée, d'adresser l'approche critique dans toute sa diversité, complexité mais aussi intérêt.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

La déclinaison des aspects transverses est clairement détaillée ci-dessous. On peut ajouter ici que l'interdisciplinarité, la sophistication des outils envisagés ne sont pas encore, pour des questions de moyens et de formation, à la portée des pays du sud et qu'il convient de dédier un effort particulier à ces régions dont le rôle, tant du point de vue des populations que des écosystèmes, est essentiel dans la mitigation du changement climatique.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- Dialogues/ partages interdisciplinaires
- La question des processus essentiels au fonctionnement de la zone critique et à son évolution avec les changements globaux reste posée

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- Ressources RH, en particulier techniques

- Technologiques : appropriation des techniques low cost et de l'IA dans la zone critique
- Implications des SHS dans l'étude de la zone critique, implication des scientifiques de la zone critique dans les problématiques SHS

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

Tout est urgent ;-D

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux
(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	L'écotoxicologie microbienne pour comprendre les effets directs et indirect des contaminants, évaluer leur biodisponibilité et développer de nouveaux outils diagnostic
Nom(s) et prénom(s)	CEBRON Aurélie, BAUDA Pascale, BEGUIRISTAIN Thierry, BILLARD Patrick, BLAUDEZ Damien, DANGER Michael, LEJEAN Marie, PAGNOUT Christophe, ZEGEYE Asfaw
Adresse(s) mail	aurelie.cebron@univ-lorraine.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	X
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les écosystèmes sont constamment exposés à des stress biotiques et abiotiques. Les études d'écotoxicologie prennent rarement en compte le compartiment microbien, bien que les microorganismes soient des acteurs clés du fonctionnement des écosystèmes et qu'ils soient à la base de nombreux réseaux trophiques complexes. En effet les microorganismes sont en interaction avec l'ensemble des autres organismes, plantes ou animaux. Une pollution peut parfois n'affecter qu'une partie de la biocénose, et n'avoir que de faibles effets directs sur d'autres organismes, mais les effets indirects et en cascade sont très souvent imprévisibles. Il faut donc favoriser les recherches pluridisciplinaires, où l'impact d'une pollution ne serait non plus uniquement regardé sur un groupe d'organismes, mais au contraire sur des réseaux trophiques entiers, ou bien sur des holobiontes, en particulier dans le cas d'essais de phytomanagement assisté par des microorganismes. Pour cela, les microbiologistes, écologues, biologistes animal et végétal doivent travailler ensemble pour évaluer à plus large échelle les répercussions écosystémiques des pollutions et des systèmes de bioremédiation mis en place. L'enjeu sera de coupler des approches en mésocosmes et *in situ* à taille réaliste afin de prendre en compte la forte hétérogénéité des sites contaminés. En parallèle, un facteur essentiel à prendre en compte pour évaluer l'impact d'une contamination sur les organismes est la biodisponibilité de ces contaminants. En effet, pour comprendre la réponse des biomes (et notamment des microorganismes), que ce soit au niveau cellulaire, populationnel ou au niveau de la structuration des communautés, il est nécessaire d'évaluer finement la part biodisponible des contaminants. Les membres de l'équipe EMMA du LIEC développent différentes approches basées sur des mesures physiques, chimiques et biologiques. Par exemple, les mesures de signal magnétique pourraient renseigner sur la disponibilité et mobilité des métaux dans les sols, et être par exemple couplée à l'utilisation de biosenseurs bactériens. Enfin, afin d'évaluer les conséquences de la contamination des milieux, il est nécessaire de développer des outils diagnostic capables de témoigner du niveau d'impact sur les communautés biologiques. Ces outils diagnostic sont déjà bien développés pour certains écosystèmes et certaines communautés, tel que pour le suivi des communautés d'invertébrés aquatiques. En revanche, de tels outils n'existent pas pour établir un suivi et un diagnostic des communautés microbiennes de milieux anthropisés.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

-Besoin RH : Bioinformaticien

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Contribution générale CNRM
Nom(s) et prénom(s)	Morin Samuel
Adresse(s) mail	Samuel.morin@meteo.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	X
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	X
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	X
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	X
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Le CNRM est un laboratoire principalement rattaché au domaine OA, mais plusieurs équipes et personnels de recherche exercent directement dans le champ du domaine SIC, principalement sous l'angle du développement du modèle de surfaces continentales SURFEX et son utilisation dans de multiples cadres d'application. Pour rappel, le modèle SURFEX représente les surfaces continentales avec le modèle ISBA, les surfaces urbanisées avec TEB, les lacs continentaux avec FLAKE, ainsi que les surfaces océaniques.

SURFEX constitue un fil rouge pour de multiples activités du CNRM dans le domaine des surfaces continentales:

- En tant que modèle de surface pour les outils de prévision météorologique planétaires (ARPEGE) et à aire limitée (AROME, sur divers territoires dans le monde). L'objectif pour les prochaines années et d'accroître le réalisme et la complexité de la représentation des surfaces continentales dans ces outils (sol et neige multicouche, amélioration de la représentation de la végétation, amélioration de la représentation des zones urbaines), tout en améliorant en parallèle l'assimilation de données permettant d'initialiser ces prévision.
- En tant que modèle de surface dans les outils de modélisation climatique couplés (CNRM-CM et CNRM-ESM représentant le cycle du carbone, au niveau planétaire ; ALADIN-Climat, et l'utilisation croissante d'AROME pour l'étude du climat, à échelle kilométrique). Là aussi, un enjeu majeur des prochaines années et l'amélioration du réalisme de la représentation des surfaces continentales y compris urbaines dans ces outils de modélisation (bilans énergétiques, d'eau, de carbone notamment). Il s'agit aussi de poursuivre l'intégration de composants du cycle de l'eau (e.g., nappes) et de l'anthropisation (barrages, irrigation) dans SURFEX y compris pour des applications climatiques. Un enjeu clé des prochaines années est la montée en puissance de la capacité à réaliser des simulations, par exemple avec AROME, pour tester l'effet climatique de modifications locales d'usage des sols (forêts, agriculture, couverts etc.) envisagées sous l'angle de l'adaptation afin d'en mesurer l'efficacité mais aussi le besoin en eau. Certaines de ces actions sont prévues dans le cadre du programme TRACCS et notamment le PC10 « LOCALISING » coordonné par le CNRM. Des travaux spécifiques portent sur l'effet de l'état des surfaces continentales sur la prévision saisonnière.
- SURFEX est utilisé pour de nombreuses applications dites « offline », c'est-à-dire utilisant le modèle forcé par des conditions atmosphériques produites préalablement (par exemple des réanalyses). Dans le domaine hydrologique (au sens large). Il s'agit notamment de la chaîne de simulation SIM2 utilisée pour de nombreuses applications hydrologiques, qui là aussi évoluent vers l'échelle kilométrique y compris concernant la représentation de l'hydrologie de surface (mise en place d'une version kilométrique de CTRIP prévue dans les prochaines années, permettant aussi d'avancer dans la modélisation de la température de l'eau des rivières). Ce travail s'inscrit notamment dans le cadre du programme OneWater et son PC2, et s'inscrit en lien avec les travaux du projet national AquifR. Là aussi, un des enjeux est de mieux représenter les activités humaines (irrigation, barrages, effet des villes) dans ces chaînes de modélisation, utilisées en temps réel comme en réanalyse ou en projection climatique (cf programmes TRACCS, OneWater, projet Explore2). Notons au passage un objectif important au CNRM de développer une réanalyse kilométrique basée sur AROME, visant à remplacer la réanalyse SAFRAN-France (à échelle 8 km). La mission spatiale SWOT et son exploitation constitue un enjeu important pour les prochaines années. SURFEX est également utilisé dans le domaine de l'étude de la végétation y compris agricole, notamment en lien avec l'assimilation de données satellitaires (outil LDAS), avec de nombreuses

perspectives y compris dans le domaine de l'étude des conditions favorables à l'éclosion et la propagation des feux de forêt. Enfin, SURFEX est utilisé pour des applications spécifiquement concernant le manteau neigeux de montagne (via le modèle détaillé Crocus inclus dans SURFEX), tant concernant le développement en cours d'une nouvelle version à haute résolution, ensembliste et assimilant des observations par satellite, du système de prévision de l'état du manteau neigeux et appui de la prévision du risque d'avalanches. Notons aussi l'application de cet outil à l'échelle climatique, dans une configuration tenant compte de l'effet du damage et de la production de neige dans les domaines skiabiles, et utilisé pour des études sur ce sujet et le développement de services climatiques sectoriels (ClimSnow).

- SURFEX est un outil très versatile, utilisé également en mode couplé avec le modèle de recherche MesoNH, utilisé pour de nombreuses investigations (effet de changement d'utilisation des sols dont, potentiellement, effet de l'implantation de fermes photovoltaïques ou éoliennes, simulations spécifiques en milieu urbain y compris à échelle hectométrique et en descente d'échelle d'études d'impact du changement climatique sur l'îlot de chaleur urbain). SURFEX est également utilisé au sein des modèles utilisés pour la simulation de la composition atmosphérique (MOCAGE, AROME-Dust), avec des développements en cours et prévus, tant sur le plan scientifique que technique, pour améliorer la représentation des émissions de divers composés par les surfaces, ainsi que leur dépôt (poussières désertiques, composés réactifs, carbones suies, cendres volcaniques).

Outre ces activités de modélisation très structurées autour du modèle SURFEX pour toutes les applications couplées et offline, à toutes échelles de temps et d'espace (y compris outre mer), le CNRM est impliqué dans des activités d'observation in-situ des interactions surface/atmosphère (par exemple projet ANR MOSAI, campagnes PANAME 2022 et 2023) et observations de surface par télédétection (caractérisation de la végétation et son état notamment via le LAI, étude de l'enneigement par satellite, notamment en montagne, tant concernant la caractérisation du manteau neigeux que la détection des avalanches). Notons aussi les activités de télédétection spatiale des bancs de Sargasses dans l'Atlantique tropical, en lien avec les interactions terre/mer au regard de l'effet de ces échouements et leurs conséquences sanitaires.

L'ensemble de ces activités s'inscrit en cohérence avec la stratégie scientifique de Météo-France, la prospective transverse de l'INSU et la prospective OA, non répétée ici. On mesure bien à quel point toutes ces activités signalées ci-dessus sont à l'interface entre le domaine OA et le domaine SIC, et la place de la modélisation, la plus intégrée possible (ce à quoi s'attache SURFEX) comme facilitateur de ces interactions et la concrétisation de ces synergies. Cette modélisation ne se conçoit pas sans un lien fort avec les études de processus et l'observation (cf exemples données ci-dessus).

Pour les prochaines années, l'enjeu est de toujours améliorer la façon dont nous nous attaquons et traitons les questions scientifiques et sociétales en rapport avec les surfaces continentales et la zone critique (anticiper les impacts et risques climatiques tout en tenant compte des rétroactions faisant intervenir les surfaces dont milieux anthropisés). Ceci passe nécessairement par la poursuite du travail de convergence technique et de développement scientifique et technique des outils mentionnés ci-dessus, dont la complexité est croissante – du fait que les questions scientifiques abordées gagnent également en complexité.

Plusieurs défis majeurs attendent la communauté dans les prochaines années, notamment la place de l'intelligence artificielle, qui d'outil parmi d'autres tend à occuper une place centrale dans la démarche même de modélisation, avec un potentiel phénoménal pour certaines questions et

applications (en prévision notamment), mais aussi des risques sur l'explicabilité des outils développés. Les enjeux de maîtrise de l'empreinte environnementale des activités de recherche sont également amenées à occuper une place croissante.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Je ne vois pas ici de thème particulièrement spécifique au domaine SIC, ces sujets ont été traités de façon très détaillée dans la prospective Océan Atmosphère qui peut servir de base utile de travail sur la plupart des sujets évoqués ci-dessus.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Le principal verrou que j'identifie n'est pas scientifique mais porte plus sur la mise en place d'approches authentiquement interdisciplinaires pour attaquer les enjeux croisés et complexes, fortement interdisciplinaires, faisant appel aux rétroactions climat/surfaces continentales à l'échelle des socio-écosystèmes locaux (territoires) et à plus grande échelle, vis-à-vis de l'évolution de leurs conditions d'habitabilité. Ceci requiert du temps, et donc des ressources pour faire émerger et consolider ces collaborations à partir des collectifs de travail disciplinaires, qui doivent aussi poursuivre leurs travaux de recherche disciplinaire.

Ceci est indispensable pour que les regards se croisent sur les sujets complexes dans le domaine de l'adaptation au changement climatique et la décarbonation, sous l'angle des surfaces continentales, et plus généralement le futur des territoires à toutes échelles et leurs sources d'énergie.

Un verrou majeur pour les prochaines années et la place que l'IA va prendre dans les travaux de recherche.

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Besoin de soutenir les activités de recherche tant fondamentales qu'appliquées dans le domaine des surfaces continentales et leurs interfaces. Outre le besoin de soutenir et renforcer les moyens humains pérennes, il faut aussi continuer de développer/renforcer les réseaux scientifiques qui facilitent les interactions multidisciplinaires, pouvant déboucher sur des collaborations et projets interdisciplinaires, qui s'inscrivent nécessairement dans le temps long.

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

Continuer de faciliter/encourager les interactions interdisciplinaires et soutenir, y compris financièrement et par des recrutements pérennes, les travaux qui en émergent.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Cette contribution s'inscrit directement en lien avec les défis ci-après :

Changement climatique : compréhension, anticipation de l'évolution climatique sur les surfaces continentales y compris milieux anthropisés, et rétroactions.

Intelligence artificielle : quelle place pour l'IA dans les sciences météo et climatiques, y compris l'effet des surfaces

Santé et environnement : interactions entre science atmosphère/surface météo & climat et sciences de l'environnement plus généralement, notamment afin de traiter ensemble, de façon interdisciplinaire, les effets et rétroactions des conditions météorologiques (y compris état physique des surfaces) sur d'autres compartiments des socio-écosystèmes. Ceci requiert des approches résolument interdisciplinaires.

Territoires du futur : Quelle habitabilité / fonctionnement des socio-écosystèmes dans un climat plus chaud ? Ceci requiert de mobiliser des outils de modélisation climatique, tout en les interfaçant finement avec d'autres approches et outils pour projeter l'évolution des territoires en tenant compte de l'évolution climatique dans toutes ses dimensions (extrêmes, ressources dont ressources en eau etc.). Ici encore, besoin d'interdisciplinarité authentique.

Transition énergétique : Comment les connaissances actuelles, et les manques de connaissances, sur l'état de l'atmosphère et des surfaces continentales, peuvent contribuer à l'élaboration de cette transition énergétique, afin de tester la faisabilité ou les conséquences de telle ou telle option sur le climat, les ressources en eau etc.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Quelle(s) grille(s) de lecture pour les réponses aux stress environnementaux ?
Nom(s) et prénom(s)	Simon Devin , Elise Billoir, Laetitia Minguez, Vincent Felten, Laure Giambérini, Elisabeth Gross, Martin Laviale, Fanny Louis, Sandrine Pain-Devin, Pascal Poupin, Philippe Usseglio-Polatera
Adresse(s) mail	Simon.devin@univ-lorraine.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	x
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	x
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	x
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	x
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Comprendre la manière dont les effets biologiques induits par un stress environnemental se répercutent entre échelles biologiques est un enjeu crucial pour l'évaluation du risque et la bioévaluation. La première étape nécessaire est d'être capable d'identifier les effets biologiques à différentes échelles d'organisation biologique et d'être en mesure d'interpréter les conséquences populationnelles des variations mesurées à des échelles plus petites, en identifiant les effets directs, indirects et des facteurs confondants comme les mécanismes d'adaptation et d'acclimatation. Cette propagation des effets recouvre donc ici les échelles spatiales, temporelles et biologiques, qui sont fortement intriquées.

La contribution proposée par l'équipe ECoSE (Ecologie du Stress Environnemental) du LIEC s'articule autour de 3 questions qu'il semble nécessaire de continuer à explorer, et des moyens à mettre en œuvre pour, au moins en partie, y répondre.

1. Prise en compte de la variabilité

Lors de travaux antérieurs, nous avons pu mettre en évidence d'importantes différences entre populations naturelles (mollusques, macrophytes) ou de laboratoires (daphnies) en terme de sensibilité aux contaminants. Cette variabilité se mesure également aux échelles intra-populationnelles (entre stades de développement, entre sexes) et aux échelles temporelles (facteurs intrinsèques de la biologie des organismes et extrinsèques). Cependant, cette variabilité est souvent occultée dans les méthodologies d'évaluation du risque environnemental, alors que sa prise en compte peut conduire à définir par exemple des valeurs seuils plus protectrices pour le biote. Cette variabilité permet également de mettre en évidence les processus d'adaptation et/ou d'acclimatation qui se mettent en place dans les populations en réponse aux contraintes du milieu. Les sciences de l'évolution doivent ainsi être prises en compte pour une meilleure compréhension (1) de nos outils de diagnostic environnemental (2) dans les conséquences écologiques à la fois d'une dégradation et d'une amélioration de la qualité des milieux aquatiques.

2. Renforcer l'interdisciplinarité

L'une des sorties de nos travaux de recherche est la production d'outils, de démarches déployables à large échelle, par un grand nombre d'opérateurs, avec un niveau d'expertise variable. Il est donc nécessaire de renforcer les liens avec d'autres disciplines (SHS – SIC & socio notamment) pour mieux cibler les attentes et les perceptions du grand public, rendre plus transparents les processus d'évaluation du risque pour une meilleure compréhension de la démarche scientifique et une meilleure reconnaissance de l'expertise.

3. Moyens à mettre en œuvre

Approche multi-stress (biotiques & abiotiques), pour comprendre les effets cocktails (encore balbutiants) et le rôle / poids des facteurs de confusion (interactions biotiques, MO...)

Observation – temps long : effet des faibles doses, effets du changement global, propagation des effets. L'observation sur le terrain reste aussi peu courante dans une démarche écotoxicologique.

S'autoriser la répétition d'expérience (même contaminant, même espèce) pour garantir la qualité des résultats et des conclusions, sortir des études « one-shot » qui ne sont que des études de cas pour identifier des patrons de réponses plus génériques. Accepter et financer les projets de consolidation de résultats, considérés comme moins innovants, et pourtant essentiels en complément des études initiales.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Acquisition de données sur le temps long : vérifier la reproductibilité des mesures (évolutions technologiques, variabilité des réactifs...)

Renforcer les sciences de l'évolution en écotoxicologie

Accepter une science pas « sexy », dont ni le territoire, ni les espèces modèles ne sont télégéniques

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Instruments de financement dédiés à la reproduction / consolidation de résultats

Renforcement substantiel des RH sur les fonctions supports

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

1. augmentation des moyens humains pour permettre l'acquisition de données chronophages

2. construire des marqueurs d'évolution induite par les stress anthropiques

3. renforcer la co-construction de projet One-Health / One Earth avec les SHS (mais les forces sur cette thématique sont-elles suffisantes dans ces disciplines ?)

4. déconvoluer les sources de variabilité

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Ressource en eau et cultures maraîchères
Nom(s) et prénom(s)	Molinié Gilles
Adresse(s) mail	gilles.molinie@univ-grenoble-alpes.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	

17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

- Comment mettre en œuvre les collaborations nécessaires à l'étude de ces interfaces ?
- Quelles zones géographiques, quels écosystèmes, et quels usages doivent être prioritairement renseignés et étudiés ?
- Quelles sont les espèces biogéochimiques dont les flux (émission et/ou dépôt) restent les moins bien contraints ?
- Sur quels modèles conceptuels et numériques doivent prioritairement porter les efforts de couplages ?

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Depuis le rapport du club de Rome sur les limites de la croissance et les travaux pionniers de Falkenmark (79) sur la ressource en eau nécessaire à l'humanité, on sait que des tensions sont probables relativement à la disponibilité de cette ressource. Il y a à peine plus d'un an, une publication dans Nature (Wang et al., 2022) ajoutait à la liste des limites planétaires atteintes, celle de l'eau disponible dans la zone racinaire des cultures et apportée par la pluie. On apprenait que le paradigme de la ressource en eau quasi-infini à l'échelle planétaire est caduque. La pénurie d'eau de pluie rend l'agriculture impossible plusieurs mois pas an. Ce fait bien connu dans les régions de basses latitudes se généralise. Dans le grand Sud de la France la séquence moisson-labour-semis n'est maintenant plus possible. La pluviométrie n'est pas suffisante pour que les semis de fin août produisent des plants.

Cette limitation de la ressource en eau engendre déjà de graves problèmes d'alimentation des exploitations agricoles en matière première, pénurie de paille, foin et céréales en 2022 et des conflits sociaux tels que ceux autour de la construction de méga-bassines.

Dans ce contexte, une variété d'initiatives personnelles ou collectives (confédération paysanne, Maraîchage sur Sol Vivant, permaculture, agroforesterie) tentent de mettre en place, voire standardiser, des méthodes de travail dont un but direct ou indirect est la conservation de l'eau verte ou verdie après qu'elle soit temporairement stockée dans la zone racinaire par une irrigation adaptée.

Nous nous focalisons ici sur les cultures maraîchères. Afin que ces méthodes conservatrices des ressources en eau, énergie et de la vie et des nutriments dans le sol, représentent à terme un réel bénéfice pour les maraîchers et l'humanité, elles doivent être évaluées de façon holistique (bilan d'eau, bilan carbone,...).

Nous proposons ici de nous intéresser à l'efficacité de l'eau verte et bleue pour la production de végétaux. On parlera aussi de l'empreinte en eau des légumes qui est l'inverse mathématique de l'efficacité de l'eau utilisée pour les cultures.

Il est intéressant de mettre en relation l'empreinte en eau des légumes et les types d'agricultures dans le détail de leur mise en oeuvre. L'agriculture de conservation des sols est garante de la durabilité des ressources nutritionnelles pour les plantes. Une de ses bases est l'utilisation de paillage soit vivant (engrais verts sur pieds couchés), organique mais mort (tonte, broyat de végétaux,...) ou synthétiques (bâches plastiques). Si tous les paillages ont un effet évident sur la limitation de l'évaporation à la surface des sols nus, ils peuvent avoir un impact sensiblement différent sur l'empreinte en eau des légumes.

Les paillages vivants par exemple peuvent être facteur d'assèchement des sols à cause de leur évapotranspiration en contre partie, ils peuvent aussi avoir un impact positif sur la croissance des champignons mycorrhiziens vecteurs de nutriments et d'eau pour les plantes. L'augmentation de la productivité d'un plant de légume fait décroître son empreinte en eau. La température et l'humidité de l'air sont aussi des facteurs influençant la productivité. Les paillages organiques en isolant thermiquement le sol de l'atmosphère sont suspectés d'exposer les légumes de printemps au gel et de ralentir leur maturation. Toutefois, bien utilisés, ils nourrissent le sol et sont particulièrement efficaces pour préserver l'humidité du sol.

Ces exemples d'effet opposés montrent la nécessité de l'évaluation scientifique multi-échelle de l'impact du type d'agriculture sur l'empreinte en eau des légumes. Multi-échelle est étendu comme le couplage à l'échelle des plantes de la biologie, l'hydrologie et la micro-météorologie de surface à l'empreinte en eau de la culture d'un légume à l'échelle d'une ferme.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Données disponibles de l'empreinte en eau des cultures légumières à différentes échelles.

Données systématiques sur plusieurs années de l'intensité de la pluie, de l'évaporation et évapotranspiration, l'apport d'eau par irrigation incluant l'efficacité de cet apport lorsqu'il est fait par aspersion, masse de légumes produits sur différents types d'exploitation : maraichage extensif ou intensif, irrigation par aspersion, goutte à goutte ou absence d'irrigation, conservation ou non des sols...

Données des paramètres d'état du sol et de l'atmosphère

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Choix de la méthodologie ;

Ingénieurs/ techniciens terrain pour mettre en place les mesures ;

Capteurs d'humidité, température, humidité du sol, pluviométrie installés sur quelques exploitations cibles ;

Mesure des rendements des cultures surveillées.

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux (<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Cette contribution s'inscrit dans l'étude pluridisciplinaire de limitation et de lutte contre le réchauffement climatique (Défi 1). Contrairement aux pratiques agricoles conventionnelles, on prête à

certaines pratiques dont on compte parmi les buts ceux de préserver l'eau, la matière organique et la vie des sols, des atouts pour limiter le réchauffement climatique, par exemple en produisant des denrées porteuses d'une plus faible empreinte carbone que celles issues de l'agriculture conventionnelle. La possibilité de verdir les sols en période de pénurie de pluie et à un faible coût en eau d'irrigation, est même un élément de lutte contre le réchauffement climatique à travers des processus de modification d'albédo, d'augmentation de l'évapotranspiration et de séquestration du carbone par la photosynthèse.

Evaluer des pratiques agricoles peut les mettre en avant si elles s'avèrent vertueuses. Les exploitations agricoles vertueuses mais de taille modeste souffrent d'un manque de reconnaissance et d'une pénurie de main d'oeuvre. La semaine type d'un.e maraîcher.e compte 70h de travail pour une rémunération de quelques euros de l'heure avec des conditions de travail qui se dégradent avec l'augmentation de la température et l'occurrence des sécheresses. On comprend que la mise en avant de ces pratiques agricoles auraient une influence sur les territoires avec toute la complexité qu'ils comportent et qui sont les objets d'étude du défi 5 (Territoires du futur).

On connaît des exemples de fermes maraîchères telles que la ferme du Bec Hellouin qui fournit des légumes annuellement à plusieurs dizaines de familles avec des coûts énergétiques très faibles (moins de 100L de gasoil consommé par an, pas d'engrais azoté synthétique) puisque les énergies fossiles sont remplacées par celles des hommes et des organismes du sol. Cette sobriété inscrit la thématique proposée dans le défi de la transition énergétique (6).

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Métaux, éléments traces et contaminants aux interfaces continentales et interactions avec les (micro)organismes : de la molécule à l'écosystème
Nom(s) et prénom(s)	D. Amouroux, M. Goni, M.P. Isaure, R. Grimaud, S. Le Faucheur , A. Ranchou-Peyruse, B. Lauga, H. Preudhomme, et membres pole Chimie et Microbiologie de l'Environnement - UMR 5354 IPREM
Adresse(s) mail	David.amouroux@univ-pau.fr , marisol.goni@univ-pau.fr , marie-pierre.isaure@univ-pau.fr , regis.grimaud@univ-pau.fr , beatrice.lauga@univ-pau.fr , anthony.ranchou-peyruse@univ-pau.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	X
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	X
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	X
13-Le continuum biotique/abiotique	X
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	X
19-Les échelles de temps dans les SIC	X
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	X

22-Autre thème ? (à préciser) : interfaces chimie-biologie	X
--	----------

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

L'ensemble des écosystèmes, qu'ils soient de surface ou profond, subissent actuellement de fortes pressions liées aux changements globaux, c'est à dire climatiques (régimes thermiques et hydriques), événements météorologiques extrêmes, acidification des océans, pratiques agro-culturelles, grandes sollicitations des ressources d'eau potable ou potabilisable et de multiples contaminations organiques et métalliques.

La biogéochimie des éléments des différents compartiments environnementaux en est perturbée tandis que les organismes vivants mettent en place différentes stratégies adaptatives aussi bien à l'échelle cellulaire qu'à l'échelle des communautés. Dans ce cadre, le projet scientifique sur les processus bio-physico-chimiques des systèmes biologiques microbiens liés aux métaux, éléments traces et contaminants dans l'équipe de Chimie et Microbiologie de l'Environnement à l'IPREM est motivé par: (i) l'importance des processus biologiques dans le devenir de nombreux contaminants métalliques ou organiques dans l'environnement, ainsi que leurs applications dans la compréhension des cycles biogéochimiques et le développement de biotechnologies fondées sur la nature, (ii) l'importance croissante des approches holistiques en complément des approches réductionnistes fondées sur des hypothèses en biologie et/ou chimie, (iii) la rareté des travaux corrélant les (méta) génomes avec les (méta) métabolomes liés aux différents contaminants à différents niveaux de complexité: molécules, cellules, consortia et communautés.

Des études devront être menées pour élucider les mécanismes :

- abiotiques élémentaires à l'échelle moléculaire et isotopique
- métaboliques et génétiques au niveau cellulaire
- d'interactions des métaux, éléments traces et contaminants avec les microorganismes, de la cellule à la communauté
- d'interactions interspécifiques dans des consortia de micro-organismes ou organismes complexes et de relations fonctionnelles au niveau des systèmes microbiens et biologiques
- fondamentaux dans les cycles biogéochimiques en général et ceux des métaux et des éléments traces, en particulier

Les (micro-)organismes, dans des conditions de carence en oligo-éléments essentiels (Fe, Mn, Zn, Se...) ou en réponse à des concentrations toxiques d'ions métalliques (Hg, Cu, As, Cd, platinoïdes, lanthanides...), adoptent des stratégies moléculaires spécifiques comme la production de métallophores, la compartimentalisation ou des bio-transformations.

Le rôle des métaux dans le fonctionnement des systèmes microbiens et biologiques complexes, ainsi que leur devenir dans les écosystèmes méritent d'être abordés par des approches complémentaires holistiques et réductionnistes. Un des objectifs à atteindre est de relier le potentiel métabolique des organismes révélés dans les (meta)génomés aux mécanismes moléculaires induits. Il s'agit donc de procéder à une caractérisation complète, à la fois qualitative et quantitative, de ces différents mécanismes aux différents niveaux de complexité (gène, cellule, communauté, écosystème). Ceci implique de décrire et de quantifier de manière globale les réponses communautaires, cellulaires, moléculaires et isotopiques de ces systèmes aux métaux dans des conditions de stress environnemental.

Les compétences de l'équipe dans ces domaines peuvent également être appliquées dans d'autres contextes tels que ceux de la transition énergétique et des défis liés (stockage géologique de

l'hydrogène, biométhanisation en usine ou in situ, sources de lithium, géothermie et séquestration du carbone, protection des aquifères...).

L'approche s'appuie aussi sur des outils analytiques maîtrisés composés d'un ensemble d'équipements permettant les développements méthodologiques et les modes de caractérisation originaux (IPREM, Equipex MARSS), en particulier dans les domaines de la spectrométrie de masses organiques (FT-ICR MS, HR MS), de la spectrométrie de masses isotopiques (MC-ICPMS, IRMS) et de l'imagerie à haute résolution (Nano-SIMS). S'ajoutent à cela des compétences en imagerie basée sur le rayonnement synchrotron (nano-cryo XRF, STXM, micro-tomographie de fluorescence X), l'absorption des rayons X (XAS) pour préciser les espèces en jeu. D'autre part, le projet met en jeu des compétences en écologie microbienne pour l'analyse de la dynamique des communautés microbiennes et en microbiologie moléculaire pour expliciter les mécanismes au niveau des cellules.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Formation : Licences et Masters où sont abordés les aspects analytiques, les observations/mesures de terrain et les bilans à l'échelle des écosystèmes. Participation des étudiants aux suivis et aux études réalisés sur les sites ateliers.

RH/Métiers : spécialiste de l'interface chimie- biologie

Science et société : Les résultats seront présentées lors d'évènement de Science ouverte auprès du grand public (Nuit Européenne des chercheurs, Fête de la Science,...) tandis que des projets de science participative dans le suivi de qualité des écosystèmes et de l'impact des activités humaines doivent être mis en place.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

A ce titre de nombreux verrous scientifiques et techniques doivent être levés et représentent un grand challenge, tels que :

-le développement de techniques de prélèvements et de préparations d'échantillons permettant des analyses moléculaires et isotopiques représentatives et fiables (haute sensibilité / résolution)

-le développement d'approches analytiques améliorant la résolution des analyses moléculaires et isotopiques à l'échelle cellulaire, en particulier en essayant d'obtenir une meilleure cohérence entre différents types d'observations basée sur des analyses résolues spatialement (imagerie), de fractionnement cellulaire ou en mode single cell.

-le développement de méthodes d'analyse permettant la détermination de la composition isotopique des métaux et des éléments traces au niveau des biomolécules (ligands, protéines) impliqués dans les mécanismes étudiés.

-le développement de modèles biologiques, axéniques ou en co-culture, permettant des manipulations, génétiques, physiologiques, moléculaires et biochimiques pour élucider les mécanismes biologiques mis en place et déterminer la fonction de nouveaux gènes.

-le développement des méthodes physiologiques, d'incubation et de croissance innovants permettant le suivi des communautés microbiennes complexes ou simplifiées pour des analyses d'interactions entre populations et de techniques microscopiques permettant de comprendre finement les comportements microbiens face aux modifications physico-chimiques du milieu.

- le développement de méthodes permettant d'explorer toute la complexité des communautés microbiennes, leur dynamique dans l'espace et dans le temps, le potentiel fonctionnel et l'activité de l'ensemble des acteurs, ainsi que les interactions au sein de ces communautés, et d'établir des liens avec le fonctionnement des écosystèmes.

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance

-RH / postdocs et chercheurs interdisciplinaires

-financement fonctionnement plateformes techniques et analytiques (exple Equipex MARSS UPPA/CNRS)

-soutien aux sites ateliers basés localement depuis plusieurs années dans le Sud Aquitain et moyens labos / mobiles associés (Exemples : hydrosystèmes Pyrénéens, littoral Côtes basque, ...)

- sites atelier pérennes et de structures autorisant l'accueil d'une large communauté de scientifiques, et du grand public.

- faciliter la mise en relation de différentes communautés sur ces zones ateliers (AAP spécifiques ouverts)

- généralisation de moyens de calcul permettant le traitement, le stockage, le partage des données générées par les études réalisées à l'échelle des écosystèmes.

Quel ordonnancement des tâches ? Lister par ordre d'importance (5 max.)

- mécanismes fondamentaux dans les cycles biogéochimiques des contaminants, des métaux et des éléments traces

- mécanismes d'interactions interspécifiques dans des consortia de micro-organismes ou un organisme complexe

- mécanismes abiotiques élémentaires à l'échelle moléculaires et isotopiques

- mécanismes métaboliques et génétiques au niveau cellulaire

- mécanismes de relations fonctionnelles au niveau des systèmes microbiens et biologiques

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux
(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Cette contribution se positionne clairement dans **le défi 4, Santé Environnement**, mais peut aussi apporter des contributions pour le **défi 1, Changement climatique** et le **défi 6, Transition Énergétique**.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Les polluants émergents dans les écosystèmes aquatiques
Nom(s) et prénom(s)	Mathilde Monperrus, Laurent Lancelor, Thierry Pigot, Bahia Khalfaoui, Rémy Guyoneaud, Séverine Le Faucheur, Mathieu Sebilo, Aubin Thibaut de Chanvalon et membres pole Chimie et Microbiologie de l'Environnement - UMR 5354 IPREM
Adresse(s) mail	Mathilde.monperrus@univ-pau.fr , severine.le-faucheur@univ-pau.fr , b.khalfaoui-hassani@univ-pau.fr , aubin.thibault-de-chanvalon@univ-pau.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	
2- Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constante	
3- Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4- Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5- Des outils aux données et aux connaissances	
6- La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7- Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9- Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	X
10- Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11- Les contaminants de la Zone Critique	X
12- Le continuum Homme/Terre/Mer	X
13- Le continuum biotique/abiotique	X
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15- L'éco-hydrologie	
16- Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17- Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18- L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	X
19- Les échelles de temps dans les SIC	
20- L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21- Energie et transition énergétique dans les SIC	
22- Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Un manque avéré de connaissances existe sur les polluants dits émergents (produits pharmaceutiques et phytopharmaceutiques, antibiotiques, hormones, anxiolytiques, pesticides, produits de soins personnels, métaux high-tech, surfactants, micro/nanoplastiques...). Ces polluants émergents sont particulièrement sensibles aux interactions biotique-abiotiques et sont largement concernés par les sous-produits de transformations.

L'identification et l'étude du devenir des polluants émergents et de leurs produits de transformation constituent des enjeux majeurs pour une gestion durable des écosystèmes aquatiques. En effet, les polluants émergents doivent être identifiés et quantifiés, évalués en terme de réactivité abiotique et biotique et de persistance dans les différents compartiments, ainsi que sur les conséquences socio-économiques et de santé environnementale notamment leurs effets sur les organismes. Cela doit aussi conduire à la mise en place d'une stratégie d'actions concertées (prévention, réduction à la source, traitements) afin de relever ce défi. La modélisation du comportement de ces polluants, de leur devenir et effet sur l'environnement et la santé humaine, représente également un outil important pour mieux appréhender les processus en jeu, et peut être d'une grande aide dans la gestion des risques induits et la réglementation pour les décideurs publics.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

Ingénieur

PostDoc

Data Scientist

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

- identification et traçage des sources

Meilleure caractérisation de l'ensemble de l'exposome via des outils analytiques, de traitement de données massives et statistiques adaptés

Le développement de l'outil de traçage isotopique pour les polluants émergents (CSIA)

- devenir et réactivité environnementale

Meilleure prise en compte des phénomènes hydrologiques extrêmes, de l'eutrophisation et des épisodes anoxiques en milieu aquatique sur la réactivité, la biodisponibilité, les transferts

- impacts

mieux comprendre les effets (cocktails) des polluants émergents sur les organismes

sur des paramètres biologiques plus spécifiques tels que des comportements de migration, de reproduction, d'évitement...pour mieux appréhender les effets à l'échelle des populations

- prise en compte des effets cocktails et multi-stress

Les effets « cocktails » et la distinction ou la combinaison toxicité chimique/physique (taille : nano) pourraient être mieux évalués chez les micro-organismes et les organismes supérieurs

Les effets multistress dans le contexte actuel de changement global, les organismes sont exposés à des stress multiples (température, stress hydrique, nutrition, pollution, ...). Mieux comprendre les effets antagonistes ou synergiques à diverse échelles (ecotox/genotox, ADN, cellulaire à population) en présence de stress multiples.

- solutions de réductions des sources

Evaluation des procédés actuels vis-à-vis des polluants émergents et de leurs composés de dégradation ou de métabolites

Développement de procédés ou identifier les facteurs favorables à la photodégradation, la biodégradation, l'atténuation naturelle voire des procédés couplés

Réduction à la source des polluants émergents (changements de pratiques) en lien avec les SHS

Quels besoins ? (Méthodologiques, RH/métiers, moyens) *Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

- recrutement de personnels techniques pérennes (ingénieurs, techniciens) pour soutenir les activités d'expérimentation et d'analyse, de manière stable afin qu'il n'y ait pas de perte en compétences

- acquisition de nouveaux moyens analytiques, mais également du renouvellement des moyens existants, développement d'outils innovants ou de surveillance/sampling innovants et moins impactants (drones, capteur/sonde autonome)

- expérimentations pluridisciplinaires allant du bassin versant amont au système côtier et des modélisations couplées

- mise en place de nouvelles zone atelier ou zone pilote sur des territoires pour centraliser les communautés scientifiques et favoriser les approches pluridisciplinaires

- favoriser les approches pluridisciplinaires en favorisant les appels à projet intégrant plusieurs disciplines y compris SHS

- développer des cursus universitaires interdisciplinaires en lien avec ces enjeux

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

- Approche terrain innovante et moins impactante (CO2) capteur/sonde (remote) et drones en parallèle d'approche plus classique
- Correlation/ meilleur synergie et usage des données notamment pour l'analyse de phénomène complexe (coktail, chemin de dégradation, transport, ou diverse echelle, GIC)
- Lier Bio, Chimie (Organique et inorga), sociétale...
- Lien avec la problématique de l'eau (qualité, gestion, preservation et accessibilité) et climat.

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

1. Changement climatique
2. Santé et environnement
3. Intelligence artificielle (données massives, statistique, corrélation et machine learning)

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Plateforme lidar-HySpec Nantes-Rennes-Caen
Nom(s) et prénom(s)	P. Launeau, D. Lague, L. Froideval, É. Beucler
Adresse(s) mail	Patrick.Launeau@univ-nantes.fr , dimitri.lague@univ-rennes.fr , laurent.froideval@unicaen.fr , dir.osuna@univ-nantes.fr

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	X
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	X
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	X
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	X
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	X
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	X
15-L'éco-hydrologie	X
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	X
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	X
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

En se basant sur l'expérience des années précédentes d'une plateforme lidar Nantes-Rennes, nous proposons, dans le cadre de la prospective SIC 2023, une plateforme destinée à l'acquisition aéroportée et au traitement de données de télédétection (principalement lidar aéroporté et, dans une moindre mesure, hyperspectrale). Cette plateforme, reposant sur une convention en cours de rédaction, s'appuie sur les deux Osu de Rennes et de Nantes et le M2C à Caen. Les trois entités possèdent des expériences différentes et complémentaires, faisant de cette plateforme une contribution originale dans cette prospective. En fonction des objectifs de recherche et des forces en présence dans les différents lieux, elle se divise en deux groupes : un consacré à l'acquisition (principalement Nantes et Caen) et un autre consacré au traitement de données (Rennes, Nantes et Caen).

Les cibles scientifiques de cette plateforme sont les littoraux (SNO Dynalit, IR Ilico), les rivières (IR Ozcar), la caractérisation de la houle, les villes (SNO Observil, IR Ozcar), les indices morphologiques de failles actives (IR Epos-France), les flux de matière dans les bassins versants montagneux et, bien qu'à l'état actuellement de projet, la caractérisation de la glace et du manteau neigeux (contacts avec S. Gascoin CESBIO, A. Lucas IPGP et C. Sotin LPG)

2.1 Acquisition aéroportée

Entre 2015 et 2022, l'acquisition aéroportée de la plateforme Nantes-Rennes reposait sur la présence de la société Geofit Expert qui jouait le rôle d'avionneur et d'opérateur. En 2022, la plateforme s'est transformée afin d'avoir une plus grande autonomie et indépendance dans les projets de recherche. Le matériel est un lidar Titan DW 600 de Teledyne Optech à enregistrement de formes d'ondes dans le vert (532 nm) et l'infrarouge (1064 nm) permettant des mesures bathymétriques (faibles profondeurs d'eau) et topographiques. En 2023, L'Osuna a passé un marché de mise en œuvre aéroportée avec la société avionneur PIXAIR, permettant d'utiliser le Titan partout où ses avions peuvent être déployés, et a organisé une formation pour les personnes opérant le lidar à bord. La première campagne d'acquisition en complète autonomie a eu lieu en octobre 2023.

Aujourd'hui, dans sa nouvelle version, la plateforme Nantes-Rennes-Caen propose toujours des acquisitions avec le Titan, propriété de l'Osuna et de l'Osur, auxquelles se rajoutent des acquisitions avec l'ALS60 (1064 nm), du M2C à Caen, opérable jusqu'à 5000 m au-dessus du sol. Elle propose également de coupler les mesures lidar avec des données hyperspectrales (VNIR et SWIR) afin de réaliser des recherches permettant sur une meilleure prise en compte de la végétation basse dans les mesures topographiques grâce à l'enregistreur lidar de retour d'ondes complet. Afin de faciliter les futures collaborations, en plus des personnels déjà formés à Nantes et à Caen, l'Osuna espère pouvoir mettre à disposition de la plateforme un personnel pour les acquisitions (procédure de recrutement FSEP en cours).

2.2 Traitement de données

Les trois unités Rennes, Nantes et Caen investiguent depuis plusieurs années des méthodologies différentes en termes de traitement de données, permettant des recherches complémentaires au sein de la plateforme.

- Osur : développement algorithmique de données lidar topo et topo-bathymétrique en géomorphologie fluviale, détection de changement en 3D et séries temporelles 3D, IA ;
- Osuna : analyse du retour d'ondes et couplage lidar/hyperspectral autour d'enjeux côtiers, urbains et failles actives ;

- M2C : analyse par nuage de points pour identification sémantique appliquée à des données lidar topographique utilisé en contexte inter-tidal, IA.

Avec une dizaine d'utilisateurs/contributeurs (5-6 C/EC, ~2 post-docs et ~2 PhD), des collaborations croissantes avec le laboratoire d'informatique de Rennes, des collaborations nationales et internationales, la partie rennaise de la plateforme (P. Leroy IR CNRS et D. Lague DR CNRS) permet une grande visibilité de ce groupe « traitement de données ». L'Osir a développé toute la chaîne de traitement permettant la classification et la correction de refraction des données lidar en contexte fluvial qu'elle a utilisé autour de projets majeurs d'acquisition en France pour le secteur académique, les collectivités territoriales ou le secteur privé (EDF). La plateforme rennaise développe depuis 10 ans des nouveaux algorithmes de traitements des nuages de points 3D issues de lidar terrestre ou aéroporté pour faciliter l'exploitation de ces données par des chercheurs en Sciences de la Terre et de l'Environnement. Par exemple les mesures de changement extrêmement précis en 3D (M3C2, algorithme devenu classique dans la communauté scientifique), la détection automatique de glissements de terrains sur des séries temporelles 3D ou la classification sémantique de données topo-bathymétriques. Ces traitements sont pour la plupart mis à disposition dans le logiciel opensource Cloudcompare (référence internationale dans la communauté académique), ou sous forme de bibliothèques Python. La partie rennaise de la plateforme développe actuellement des méthodes de traitement du retour d'onde complet par deep learning en collaboration avec les chercheurs en IA.

Les traitements développés à Nantes (P. Launeau PU Nantes Université), au-delà des approches classiques en analyse de nuages de points, se focalisent sur des approches par lancer de rayon pour un meilleur couplage entre pixel hyperspectral de réflexion solaire et pixel à double retour d'onde LiDAR. La différence entre réflexion spéculaire et diffuse permet d'accéder à des mesures physiques des propriétés de surfaces révélées par des différences de réponses. Ceci a pour conséquence de pouvoir séparer les différentes contributions des microreliefs et de la végétation au ras du sol, particulièrement pertinent dans la caractérisation topographiques des littoraux et des possibles modifications liées aux changements climatiques. Dans un tout autre domaine d'application, des méthodes appliquées à la caractérisation de la rugosité des surfaces de la glace sont également développées afin d'être testées sur des cibles en France et pouvoir, à terme, apporter des interprétations de mesures faites lors de missions spatiales comme la mission Juice, équipée de lidar à retour d'ondes vert, pour étudier les satellites de glace.

L'approche par nuage de points, développée à Caen (L. Froideval IR CNRS) permet une identification sémantique automatisée d'objets en milieu naturel. Une version du logiciel cLASpy_T, permettant la mise au point de modèles de machine learning adaptés à chaque application, est disponible *via* github. Le développement de méthodes dédiées à la comparaison entre données lidar et données satellitaires (SWOT) sont également en cours afin de mieux caractériser les états de la mer.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Formation, Territoires, RH/métiers, égalité des chances, recherche bas carbone, responsabilité environnementale, recherche aux Sud

L'Osir organise depuis 2022 une école d'été internationale annuelle à Rennes pour former la communauté scientifique au traitement de données de télédétection lidar, ce type d'initiative facilite grandement la montée en compétence des doctorants, post-doctorants, ingénieurs et chercheurs souhaitant exploiter les données 3D dans leur thématiques scientifiques.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

1. RH pour assurer une capacité à répondre aux projets de recherche, notamment en termes d'acquisition (procédure FSEP en cours à l'Osuna pour 0.5 ETP).
2. D'un point de vue méthodologique, la diversité de ce qui est proposé est une force permettant d'offrir des solutions, en termes de traitement de données, standard et éprouvées mais aussi des chantiers innovants comme l'apport de l'IA dans le traitement des nuages de points et du retour d'onde complet.
3. Même si la plateforme tend vers une autonomie financière, la maintenance du matériel peut être couteuse (les instruments sont très fragiles)

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Parmi les six défis sociétaux, cette plateforme peut apporter des réponses dans au moins trois d'entre eux :

1. Changement climatique : modifications des traits de côtes et analyse quantitative des volumes sédimentaires déplacés lors d'événements extrêmes, prédictions précises des zones inondées en cas de crues, suivi de l'impact topographique ou sur la végétation d'événements extrêmes (crues éclairées, tempêtes, incendies...), calibration entre lidar et satellites permettant des mesures précises de la houle, modification de la surface du manteau neigeux.

3. Intelligence artificielle : des algorithmes par nuages de points incorporent déjà des algorithmes de deep learning pour caractériser les surfaces observées

5. Territoires du futur : le survol des villes et agglomérations, notamment dans le cadre du SNO Observil permettra, de suivre l'évolution de la biodiversité en ville, et de contribuer, grâce à des données 3D à jour et une cartographie de la typologie des surfaces via l'hyperspectral, à une modélisation précise de l'îlot de chaleur urbain.

Prospective SIC 2023

1/ Identification de la fiche et du/des thèmes concernés :

Titre contribution (facultatif)	Vers une stratégie nationale autour des données 3D et séries temporelles 3D haute résolution
Nom(s) et prénom(s)	Groupe de travail GT4D INSU/SIC : Dimitri Lague, Paul Leroy (OSU Rennes) ; Patrick Launeau, Eric Beucler (OSU Nantes); Marion Jaud (IUEM Brest); Laurent Froideval, Edward Salameh (M2C Caen); Simon Gascoin (CESBIO).
Adresse(s) mail	Dimitri.lague@univ-rennes.fr (pour le groupe de travail)

Thèmes concernés (choix multiple possible)

1- Observations	X
2-Les Surfaces et Interfaces Continentales et son programme national (EC2CO) dans un paysage en évolution constant	
3-Positionnement stratégique de la communauté SIC	
4-Continuum Sciences-Sociétés : transdisciplinarité, co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire	
5-Des outils aux données et aux connaissances	X
6-La zone critique urbaine et péri-urbaine	
7-Intégration des processus évolutifs courts (bactéries) et long (macro organismes - communautés) sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs trajectoires	
8- Rôle des organismes vivants et de la redondance fonctionnelle dans la résilience des écosystèmes - Apport des nouvelles approches omiques, de leurs combinaisons, et de l'ADN environnemental	
9-Temps de réponses caractéristiques et trajectoires des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques	
10-Quantification du rôle de la structure spatiale sur le fonctionnement des écosystèmes du biofilm aux paysages et bassins versants	
11-Les contaminants de la Zone Critique	
12-Le continuum Homme/Terre/Mer	
13-Le continuum biotique/abiotique	
14- Dynamiques des flux de matières dans et entre les compartiments de la Zone Critique aux différentes échelles d'espaces et de temps - des processus élémentaires aux conséquences régionales	
15-L'éco-hydrologie	
16-Les SIC dans leurs interfaces avec l'atmosphère	
17-Les SIC dans leurs interfaces avec la Terre interne	
18-L'écotoxicologie microbienne pour répondre aux enjeux émergents de la qualité des SIC	
19-Les échelles de temps dans les SIC	
20-L'interdisciplinarité dans les SIC et à ses interfaces	
21-Energie et transition énergétique dans les SIC	
22-Autre thème ? (à préciser) :	

2/ Contribution à l'exercice de prospective (format libre) :

Les sources de données **3D à haute ou très haute résolution** (< 1 m de résolution spatiale) se multiplient (e.g., lidar aéroporté/terrestre, photogrammétrie low-cost par drone, stéréo satellitaire) pour **l'analyse de la topographie, de la végétation, des infrastructures** et de la **bathymétrie des zones peu profondes**. La **précision de ces données**, permet la constitution de séries temporelles permettant la mesure directe des vitesses d'évolution des éléments constitutif du paysage de manière synoptique. Elles ont une **richesse thématique** (géosphère, biosphère, hydrosphère, anthroposphère) qui les rend essentielles pour **mesurer et comprendre la dynamique de la surface terrestre**. Elles sont donc très utilisées dans les domaines SIC et TS de l'INSU depuis une dizaine d'années. Des services communs et plateformes d'acquisition aéroportées, terrestres ou par drones de différents types de données 3D ont émergées dans différents sites, des algorithmes de traitement ont été développés par différentes équipes, mais bien souvent de manière indépendante et sans réelle coordination ou de structuration nationale. L'articulation avec l'IR DataTerra pour la mise à disposition des données 3D et séries temporelles 3D, en particulier de nuages de points 3D, est aussi à préciser.

Un groupe de travail a été constitué par le domaine SIC-INSU pour proposer une stratégie nationale autour de **l'acquisition, de la mise à disposition et le traitement avancé de séries temporelles 3D** (dites données 4D), afin de valoriser très largement ces données et fédérer la communauté scientifique nationale autour de la donnée 4D en Sciences de la Terre et de l'Environnement. L'ouverture à la communauté INEE autour des enjeux de caractérisation et suivi de la biosphère végétale est particulièrement pertinent vu la convergence de besoins et de traitements de données. Cette réflexion et structuration est d'autant plus nécessaire que l'intégralité du territoire national sera couvert en LiDAR haute définition (10 pts/m² minimum, projet LiDARHD) à l'horizon 2025 par l'IGN dans le cadre du plan de relance faisant ressortir un important potentiel scientifique, tout comme un fort besoin de développement de traitement de données utilisable par les chercheurs non-spécialistes. Cependant, comme LITTO3D avec le SHOM, cette couverture est décennale et les séries temporelles nécessitent des moyens complémentaires d'acquisition.

Afin d'accompagner la réflexion du GT4D, un sondage national va être lancé au 4^{ème} trimestre 2023 en collaboration avec l'IR DataTerra auprès des unités INSU et INEE. Ce sondage vise à dresser un état des lieux des utilisations actuelles de données 3D et 4D, et à recenser les besoins en termes :

- **d'acquisitions** : précision, résolution, étendue, fréquence d'acquisition, budget mobilisable, lidar ou photogrammétrie, couplage avec d'autres capteurs, articulation drones vs aéroporté, ...
- **de traitements** : nuages de points 3D, séries 4D, retour d'onde complet, besoins thématiques, besoins en formation de la communauté, moyens de calcul...
- **de stockage et mise à disposition des données** : efficacité des pratiques et solutions existantes, formats souhaités, volumétrie des besoins,...

Les résultats de ce sondage serviront à évaluer les moyens à mettre en œuvre par le CNRS et les pôles de données de l'IR Data Terra pour répondre aux besoins de la communauté.

Pour la prospective SIC, nous proposons une contribution dans le cadre de l'atelier « Données en SIC : observation et instrumentation, services et entrepôts, outils et modèles » autour des résultats du sondage national et des premières pistes de réflexion sur la stratégie à mettre en œuvre à l'échelle nationale.

3/ Déclinaison des aspects transverses dans la contribution (si adapté, format libre) :

Les enjeux liés au suivi de territoires à fort enjeux environnementaux et sociétaux (e.g., trait de côte, risques gravitaires, dynamique post-incendie...) pourront être discuté afin de discuter l'articulation possible entre stratégies d'acquisition portées le CNRS et celles portées par les collectivités territoriales.

L'impact environnemental des différents modes d'acquisition de données 3D (en particulier, avion vs drone) sera présenté afin d'étayer la réflexion sur les stratégies d'acquisition de séries temporelles.

4/ Déclinaison de la contribution dans la feuille de route des prospectives (si adapté) :

Quels verrous ? *Lister les principaux verrous par ordre d'importance (5 max.)*

Quels besoins ? *(Méthodologiques, RH/métiers, moyens) Lister les principaux besoins par ordre d'importance*

Quel ordonnancement des tâches ? *Lister par ordre d'importance (5 max.)*

5/ Positionnement de la contribution au regard des défis sociétaux

(<https://www.cnrs.fr/fr/les-six-grands-defis-de-societe-du-cnrs>, si adapté) :

Les données 3D et séries temporelles 3D sont principalement au cœur de 3 des 6 défis sociétaux suivant :

- **Changement climatique** : suivi de l'érosion du trait de côte, prédiction du risque de submersion, suivi de la biomasse des forêts et prédiction de la dynamique des feux de forêts, suivi de l'érosion et des aléas gravitaires dans les zones montagneuses, prédiction des zones inondées à haute résolution, mesure de l'impact des événements extrêmes (crues, tempêtes, sécheresse...) sur la topographie, la végétation et les infrastructures
- **Intelligence artificielle** : les séries temporelles de données 3D sont des données fondamentalement massives (volume, hétérogénéité, vitesse...) dont l'exploitation scientifique passe désormais quasi-obligatoirement par une phase de prétraitement par des algorithmes de machine learning et deep learning, en particulier pour des enjeux de classification, segmentation, détection de changement, inversion des paramètres physiques, interpolation.... Beaucoup d'algorithmes restent à développer en lien avec les enjeux scientifiques propres à chaque communauté.
- **Territoires du futur** : via la création de jumeaux numériques à haute résolution des paysages et des milieux urbains, les données 3D sont une des données de base de simulation prospectives spatialisées à résolution métrique : la modélisation des îlots de chaleur urbain, de la diffusion des pollution atmosphériques, inondations et écoulements de surface.... Les séries temporelles 3D permettent quant à elles le suivi de la dynamique d'un territoire dans sa composante végétale, topographique et infrastructures humaines.