

Prospective SIC 2023

Document de synthèse préliminaire des ateliers

Titre de l'atelier	Zone critique urbaine et péri-urbaine
Nom(s), prénom(s), Adresse(s) mail des coordinateur.trice.s	Jérémy Jacob, Béatrice Béchet
Membres du groupe d'animation de l'atelier	Isabelle Calmet, Jean-François Léon, Jean Nabucet, Pierre Le Pape, Anaëlle Simonneau, Thomas Thiebault
Date/version du document	30/01/2024

1/ Mode de fonctionnement de l'atelier :

- Réunion de préparation du travail et de distribution de la lecture des contributions et documents annexes (prospectives, rapports de conjoncture...) par les membres de l'atelier (au moins deux lecteurs par contribution)
- Compilation des éléments des contributions et documents support sous forme de bullet points dans un document partagé
- Organisation des idées recensées dans la trame fournie par la CS SIC lors d'une réunion en visio le 06/12/2023
- Présentation du document de synthèse à la CS SIC le 15/12/2023
- Transmission aux contributeurs et à des personnes extérieures à la communauté, identifiées par les membres de l'atelier, du lien vers le document de synthèse pour relecture et commentaires avant le 15/01/2023
- Intégration des remarques/commentaires faites sur le document en ligne (29/01/24)

2/ Contribution scientifique :

Présenter la synthèse du travail préliminaire en atelier (nb de pages ~≤2-3 – non finalisée) :

Les milieux urbains concentrent l'ensemble des enjeux propres aux SIC mais sont également partagés avec d'autres domaines de l'INSU (OA) et d'autres instituts du CNRS, notamment l'INEE, l'INSIS, en référence à la technosphère (réseaux sous-terrains, surfaces imperméables, bâti...) et INSHS (société civile, densité de population), mais aussi avec d'autres établissements de recherche (CEREMA, INRAE, IRD...) et surtout avec d'autres acteurs tels que les collectivités, les opérateurs et les citoyens : la société civile en général. Les socio-écosystèmes urbains sont décrits comme étant très hétérogènes et soumis à des trajectoires temporelles complexes. Matières et matériaux y sont diversifiés, d'origine majoritairement anthropique, et très concentrés du fait d'un usage intense des ressources et de la génération de déchets, dont les flux et les impacts représentent des enjeux sociétaux forts. Certains milieux urbains présentent même une sensibilité accrue aux forçages anthropiques : villes côtières (dont celles construites en lien avec les mangroves), villes du Sud à forte densité et croissance démographique...

(i) *Grands thèmes (de façon la plus intégrative possible au regard des contributions reçues)*

1. Structure et aménagement du milieu urbain :
 - Technosphère en interaction avec l'écosystème : réseaux, structures souterraines, mines urbaines, bâti, infrastructures routières...

- Caractéristiques des sols urbains (*technosols-anthroposols*)
- Terres excavées : usage en remblais et sols reconstruits, conséquences sur la stabilité des terrains, surface nécessaire au stockage
- Outils et de méthodes de caractérisation très fine de l'occupation des sols (ex. Lidar)
- Rendre la ville « accueillante » pour le vivant : compléter les réseaux trophiques pour réduire les nuisibles (rongeurs, moustiques...), développement d'espace d'accueil - zones humides, arbres, jardins partagés

2. Caractérisation et dynamique des matières

Nous touchons ici la question du métabolisme urbain au sens large, avec un focus prononcé sur les substances contaminantes (non-exclusif) : biocides, particules minérales issues des activités humaines, antibiotiques, produits pharmaceutiques, drogues licites et illicites, produits de soin personnel et cosmétiques, résidus d'alimentation, produits industriels, plastiques, ETM, bioaérosols (pollens, les microorganismes, les débris et excréments d'animaux, de végétaux et de microorganismes), microparticules, plastiques et autres matériaux organiques anthropiques (particules de pneus...)...

Il s'agit en particulier de :

- Identifier les formes chimiques des contaminants (dont spéciation) et les mécanismes à l'échelle moléculaire responsables de leur mobilité et de leur transformation
- Identifier les sources, quantifier les stocks et les flux, et définir les hétérogénéités spatiales et logiques temporelles
- Mieux comprendre les cycles biogéochimiques et en particulier celui de l'eau en milieu urbain :
 - Les impacts de la structure urbaine sur l'hydrologie
 - Des améliorations dans la modélisation du cycle de l'eau (précipitations-crues)

3. Processus d'interactions à petite échelle

- Interactions entre composantes minérale/organique/biologique :
 - Actions des communautés microbiologiques sur la transformation des contaminants
 - Réactivité des polluants et processus aux interfaces avec les matrices
 - Atténuation et remobilisation
 - Développement de procédés de remédiation
 - Effets cocktail
 - Réactions aux interfaces eau/biofilms
 - Interactions des ADN/ARN/protéines avec les matrices minérales et organiques
 - Identifier les phases porteuses/vecteurs de pathogènes
 - Développer les méthodes d'analyse sur matrices complexes

4. Processus d'interactions à grande échelle

- Continuum sol-eau-végétation-bâtiment-atmosphère (entendu comme un système dans lequel les interactions entre composantes se traduisent par des flux dans les 2 sens) (en lien avec la communauté OA) :

- S'inspirer des observations et modélisations en milieu forestier -> transfert à envisager des techniques d'observation du transfert de l'eau dans les arbres et des modèles au milieu urbain
- Transfert de polluants à grande échelle entre les compartiments de la matrice urbaine, en particulier en période de pluie
- Interactions aux interfaces :
 - Eau/sédiment-sol
 - Eau/atmosphère
 - Sol-atmosphère : dynamique des aérosols (et bioaérosols en particulier)
- Multi-échelles (rue-région) : couplages modèles météorologiques et qualité de l'air sur des questions de santé, en lien avec l'exposome

5. Toxicologie/écotoxicologie

- Biodisponibilité des composés chimiques en fonction de la spéciation et des processus d'adsorption (complexation)
- Biorésistance des communautés à certains contaminants chimiques spécifiques
- Impacts des polluants sur les communautés biologiques (dont humaine = santé)
- Effets cocktail et impacts des produits de transformation

6. Trajectoires temporelles

- Identifier les seuils de résistance, de résilience et d'irréversibilité des altérations anthropiques auxquels les écosystèmes urbains sont soumis
- Rétro-observation :
 - Identifier et décrypter les archives géologiques (sédiments et spéléothèmes) et biologiques (cernes d'arbres) de l'Anthropocène, témoins de l'histoire urbaine (pratiques, pollutions...) (voir livre blanc Paléo).
 - Calibrer les indicateurs :
 - Caractériser les sources et la dynamique des traceurs :
 - Particules minérales anthropiques qui constituent les briques de construction des archives sédimentaires urbaines.
 - Traceurs organiques : polluants, particules organiques, ADN/ARN/protéines...
 - Relier quantitativement les traceurs aux phénomènes dont ils témoignent
 - Étudier les processus aux petites échelles pour mieux calibrer les indicateurs minéralogiques, chimiques (biomarqueurs, ADN/ARN...) et isotopiques
 - Relier les évolutions temporelles des traceurs aux évolutions environnementales et sociétales
 - Dater les archives
- Caractériser l'évolution de l'occupation/usage des sols, retracer l'histoire des fronts d'urbanisation (frontière urbain/périurbain) et autres zones de transition

7. Risques :

- Impacts du changement climatique (îlots de chaleur, inondations, événements météorologiques extrêmes et futurs...) et résilience des villes. Initiatives de type Smart City

- Impacts des aménagements sur le microclimat urbain et sur la résistance au changement climatique (végétalisation/nature en ville, lien pollution air)
- Stabilité du sous-sol urbain / bâti
- Risques sanitaires associés aux risques chimiques (contaminations sols, eau, air), climatiques, et à l'aménagement -> Multirisques
- Santé/santé environnementale
 - Exposome, OneHealth, microbiote, aérobiome...
 - Dynamique des bioaérosols et impacts sur la santé

8. Ressources, valorisation et solutions :

- Sols et terres excavées
 - Remédiation des sols et terres contaminés :
 - Apport de l'étude des réactions radicalaires pour la dégradation des contaminants organiques dans les sols, les sédiments et les nappes.
 - Apports de la phytoremédiation
 - Bioprocédés et biotechnologies pour le traitement des pollutions urbaines ou la dépollution des sols par la connaissance des interactions communautés microbiennes/composés chimiques
 - Usage en reconstruction de sols et sédiments urbains, nouveaux matériaux de construction
 - Stabilisation du carbone (augmentation du temps de résidence dans les sols)
- Eaux
 - Concept de ville poreuse (récupérer les eaux de pluie et les infiltrer) :
 - Quels impacts sur la remobilisation des polluants, sur la stabilité du sous-sol ?
 - Quelle place pour la désimperméabilisation ? Quelles performances des ouvrages de désimperméabilisation sur les contaminants ?
 - Réutilisation des eaux urbaines :
 - Filières eaux pluviales/eaux usées
 - Séparation à la source des eaux et/ou des nutriments des eaux usées
- Air
- Déchets - Recyclage/ré-use/économie circulaire
 - Boues de STEPs :
 - Indicateurs de la qualité du traitement
 - Amélioration des traitements
 - Recyclage N et P des eaux usées
 - Nouvelles politiques publiques : gestion du compost
- Ingénierie écologique / végétalisation / préservation/conservation

9. Impacts du milieu urbain sur le péri-urbain et sur le territoire :

- Contamination des hydrosystèmes (eutrophisation, contamination des sédiments, nappes ?...)
- Impacts sur la chimie atmosphérique (dont flux de GES)
- Impact du microclimat urbain sur le climat alentour
- Impacts sur les écosystèmes côtiers (mangroves)

(ii) Pistes de réflexions, incluant les axes de recherche et les innovations méthodologiques à développer,

Échantillons

- Accès aux échantillons (aspects légaux, propriété...)
- Archivage et partage des échantillons

Mesures / moyens expérimentaux / Instrumentation scientifique

- Proxys du futur (ADN), bioindicateurs de l'état des écosystèmes et des populations humaines - Métagénomique, séquençage haut débit
- Développement des approches « omiques » pour établir une hiérarchie des pressions naturelles et anthropiques à partir du potentiel génétique des populations microbiennes
- Capteurs : capteurs frugaux, capteurs basés sur la microfluidique, capteurs agiles adaptés aux conditions du milieu
- Réaliser une veille sur les évolutions de la métrologie
- Géophysique appliquée à l'étude des transferts eau-sol-végétation
- LIDAR, mesures aéroportées, satellitaires/spatiales pour améliorer la résolution des MNT
- Densification des réseaux de mesure urbains via, par exemple, participation citoyenne

Expérimentation

Poursuivre les exercices d'expérimentation sur les objets du milieu urbain, par exemple sur les sols (colonnes de sols) et dépôts (sédiments) urbains

Modèles/données

- Descente d'échelle en modélisation et observation (données à haute résolution spatiale jusqu'au quartier, à la rue, aux bâtiments) pour rendre compte de la complexité (optimisation des modèles de surface), des hétérogénéités intra-urbaines, pour caractériser l'empreinte humaine/urbanisation sur les hydrosystèmes, et des couplages avec l'extérieur de la ville
- Amélioration de la paramétrisation des modèles de surfaces continentales (description plus fine des processus physiques et biogéochimiques)
- Modèles de chimie-transport couplés aux modèles de surface
- Faciliter l'accès aux données issues de la recherche académique, de l'opérationnel et aux données utiles pour des études pluridisciplinaires
- Intégrer, pour les comparer, les données provenant de sources multiples (communautés disciplinaires, opérationnels, données issues de la recherche participative...), notamment pour étudier les impacts. Besoin de collaborations avec les mathématiques, sciences de l'information et informatique pour la fouille et l'analyse de données (Big Data, IA...).

Exemples :

- Accessibilité des données issues des campagnes Paname 2022 et 2023.
- Connexion aux bases de données épidémiologiques pour aborder les questions de multi-expositions et le suivi des impacts en lien avec l'évolution de la ville et de ses aménagements.

(iii) *Actions phares et jalons. Merci d'indiquer clairement les points saillants du travail de synthèse préliminaire, qui seront abordés lors du colloque de prospectives pour animer des discussions en sessions parallèles,*

La Ville pourrait être un objet d'étude pleinement assumé par la CID52

(iv) *Exprimer les besoins éventuels à discuter et à qui ils doivent être adressés,*

1. **Organiser l'interdisciplinarité**

Le besoin d'interdisciplinarité est exprimé dans les contributions de manière régulière et affirmée, mais à des échelles variées. Les silos disciplinaires sont un frein à l'identification de questions partagées et à une vision et résolution globales des enjeux. Au sein des SIC, les disciplines concernées sont principalement la pédologie (et le génie pédologique), la physique des sols, l'écologie, la microbiologie, l'hydrologie, l'agronomie, la géologie, mais aussi bien plus largement : génie civil, biologie moléculaire, écotoxicologie, psychologie environnementale, l'ingénierie environnementale... Cette interdisciplinarité est nécessaire au développement d'une véritable « écologie urbaine ».

Au-delà, le milieu urbain réclame une approche plus large recrutant des disciplines aussi diverses que la philosophie, l'anthropologie, la géographie, la sociologie, l'économie (dont économie écologique), les sciences politiques, les études littéraires et historiques (dont histoire environnementale), l'art, le design ou les sciences de la santé, pour connecter l'écologie urbaine aux « humanités environnementales ».

- Renforcer le partage interdisciplinaire des pratiques et expériences
 - Développer les démonstrateurs multi-acteurs, capitaliser sur les REX « éco-quartier »
 - Acceptabilité sociale des changements structurels
 - Incorporation des territoires ruraux attenants dans la politique de la ville

2. **Structurer l'observation au regard d'enjeux interdisciplinaires**

S'appuyer sur les structures existantes d'observation :

- Le SNO Observil est une avancée majeure dans le paysage de l'observation urbaine.

Limites actuelles :

- Adaptation nécessaire du « corpus » de paramètres de type « corpus de l'IR OZCAR » ou de SNO pour le milieu urbain. Ils sont peu adaptés au milieu urbain (et plus généralement aux milieux anthropisés – sols pollués, friches industrielles)
- Il est souhaitable d'élargir les observables actuellement mesurés dans Observil et de les connecter aux observables d'autres communautés (notamment exprimé dans la communauté OA) via par exemple des protocoles d'échantillonnage communs, des unités de lieu et de temps des campagnes d'échantillonnage, des bases de données communes....
- Peu ou pas de sciences humaines et sociales sont actuellement intégrées dans Observil (et dans les SNO ou OZCAR, plus largement).

Besoins, propositions :

- Renforcer le lien avec les OHM et ZA pour fédérer localement les approches interdisciplinaires, et notamment rapprocher SHS et sciences de l'environnement. Les FRE, GDR, IRN et LIA doivent aussi être mis à profit ou servir de support.
- Développer des « Sites Master » et « Super-sites » urbains
 - Identifier des « Sites Master Ville » dans OZCAR
 - Renforcer le potentiel expérimental et le rôle de coordination de « super-sites urbains »

- Déployer la plateforme d'observation « TERRAFORMA » dans ces Super-sites urbains au titre des « observatoires nouveaux de l'Anthropocène »
- Clarifier les rôles et identifier les complémentarités des différents types de structure d'observation existantes ou en projet
- Développer ou renforcer des dispositifs (Observatoires interdisciplinaires) pour faire dialoguer sciences SIC/INSU, autres disciplines et l'ensemble des acteurs.

Objectifs :

- Mélanger les questions scientifiques / Identifier les questions partagées
- Mélanger les acteurs (citoyens, opérationnels, décideurs, législateurs...)
- Produire et accompagner la production et la diffusion des connaissances utiles aux politiques publiques

3. Organiser et renforcer les liens avec les décideurs et opérationnels

A la diversité interne au champ scientifique des SIC répond celle d'une multitude d'acteurs de l'action publique (gestionnaires, collectivités, élu.es/agents, industriels...). Cela peut rendre l'intégration de la recherche dans ou le transfert des connaissances vers l'opérationnel difficile, alors qu'il s'agit d'une demande forte. Par ailleurs, les liens à établir comportent une dimension territoriale évidente pour les milieux urbains, si bien que chaque interaction est unique et les réalités locales difficilement comparables. Développer ces interactions est pourtant nécessaires pour renforcer les liens entre connaissance et décision/action publique dans une optique de développement durable. Le paysage complexe de la recherche académique ne permet pas aux acteurs de la société civile d'identifier facilement les interlocuteurs par défaut de lisibilité.

Les pistes d'amélioration et les propositions sont les suivantes :

- Mieux coordonner l'interface avec les acteurs académiques et socio-économiques en lien avec l'aménagement du territoire et la surveillance opérationnelle (protection des populations face aux risques environnementaux et amélioration de la résilience et de la durabilité des villes)
- Développer des tableaux de bord partagés avec les opérationnels, basés sur la richesse en indicateurs que peuvent proposer les scientifiques de la communauté SIC, en collaboration avec d'autres disciplines
- Co-construire des plans de gestion intégrant à la fois la prise en compte de la conservation des processus (ex : mangroves), les besoins et aspirations des communautés locales (ressources, biens et services) pour une gouvernance durable et équitable
- Le transfert de connaissances vers les acteurs socio-éco-politiques par les seules publications scientifiques ne suffit pas. Il faut imaginer de nouvelles modalités de transfert vers l'opérationnel (cahiers du GREC par exemple)
- Disposer de structures adaptées au dialogue avec les décideurs et opérationnels :
 - S'appuyer sur les structures existantes et les renforcer (PIREN-Seine/ZA, GREC, GRAIE/OTHU...)
 - Imaginer de nouvelles structures :
 - Communauté de Savoir Ville Durable (IRD)
 - Un « Urban Living Lab » par ville, qui s'appuierait sur des collectifs de travail disciplinaire, en résonance interdisciplinaire, avec le concours de l'ensemble des acteurs de la société civile (collectivités, législateurs, industriels, opérateurs, citoyens).

- Laisser l'initiative aux partenaires non-académiques pour imaginer des structures d'échanges interdisciplinaires en lien avec la société civile (type GREC ou initiative Paris-Recherche)

4. **Consolider, développer, et organiser les liens avec les citoyens**

- Sciences participatives
 - Intégration de l'expertise citoyenne (savoirs locaux, expertises non-scientifiques, savoirs multiples) via les Sciences participatives : co-construction des questions et de la stratégie, acceptation, implication
 - Bénéfices : Information/éducation aux sciences, changements de pratiques/modes de vie
 - Faire un bilan des recherches-action déjà réalisées : retour/partage d'expérience...
- Médiation
 - Prise de parole des scientifiques spécialisé.e.s dans la complexité socio-environnementale dans les médias pour expliciter les questions environnementales, renforcer le dialogue science-société, et participer au déminage des fausses informations. -> Mettre en avant les « expert.es » des SIC.
 - Les démarches artistiques comme vecteur d'accessibilité des recherches environnementales, en particulier en milieu urbain

Un point commun entre les points 3 et 4 concerne les modalités de co-construction des connaissances avec la société civile.

(v) *Expliciter les potentielles zones de recouvrement avec d'autres ateliers. :*

2. Données en SIC : mesure et instrumentation, services et entrepôts, outils et modèles

- Voir paragraphe Modèles/données

3. Observons nos observatoires

- Voir (iv) 2. : Cartographier et organiser la multitude d'initiatives d'observations en ville. Question hautement pluridisciplinaire (SIC/OA/santé/sociologie/histoire/économie), transverse aux établissements, d'intérêt pour les opérateurs et les décideurs mais aussi en lien avec les dispositifs d'observation en sciences participatives, le SNO Observil...

4. Interfaces et Continuums dans les SIC

- Voir paragraphes 3 et 4

5. Continuum Sciences-Société et transdisciplinarité : co-construction de la recherche-action pour accompagner la transition des territoires

- Voir (iv) 3.

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

- Voir paragraphe 8

7. Contaminants et pollutions : devenir, impacts et solutions

- Voir paragraphes 3, 4, 5, 6, 7, 8 et 9

8. Intégration des différentes échelles d'espace et de temps dans la zone critique

- Voir Modèles/données

9. Responsabilité environnementale de la recherche en SIC

- Le sujet n'est pas ou peu abordé si ce n'est en tant qu'objet d'étude : impact environnemental/valorisation des déchets/impacts sur les émissions de GES mais aussi à travers le transfert de connaissance aux décideurs et au citoyens

3/ Aspects transverses :

Décrire les aspects transverses (formation (apprentissage, continue, ...), moyens, les RH/métiers/compétences/outils à maintenir/développer/inventer, l'égalité des chances, Recherche au Sud, responsabilité environnementale ...) identifiés lors du travail préliminaire en atelier (non finalisé). Exprimer les besoins éventuels qui seraient spécifiques aux aspects transverses à discuter et à qui ils doivent être adressés.

Peu/pas de retours dans cette section.

A construire durant le colloque de prospective

4/ Eléments éventuels pour alimenter le bilan des dernières prospectives :

Identifier les éléments de bilan des dernières prospectives SIC 2017-2022 (~≤10 lignes – non finalisé) qui ont été traités et comment ceux-ci alimentent la présente prospective (par ex : nouvelles thématiques/compétences, nouveaux outils/métiers qui n'auraient pas été identifié.e.s lors des dernières prospectives, thématiques qui auraient particulièrement avancé ou bien au contraire qui n'auraient pas pu se développer au regard des objectifs annoncés dans les dernières prospectives).

A construire durant le colloque de prospective

Prospective SIC 2023

Document de synthèse préliminaire des ateliers

Titre de l'atelier	Données en SIC : mesures et instrumentations, services et entrepôts, outils et modèles.
Nom(s), prénom(s), Adresse(s) mail des coordinateur.trice.s	PELLETIER Manuel, manuel.pelletier@univ-lorraine.fr
Membres du groupe d'animation de l'atelier	Élisa BRUNI, Aude CHAMBODUT, Olivier DAUTEUIL, Agnès DUCHARNE, Virginie GIRARD, Laurent LONGUEVERGNE et Anne PUISSANT.
Date/version du document	2024 02 01 V7 - 27p.

1. Mode de fonctionnement de l’atelier	3
2. Contribution scientifique - Constats.....	3
A. Mesures et instrumentations.....	4
1. Développements instrumentaux/méthodologiques.....	5
2. Maintien des capacités d’observations et d’analyses.....	7
3. Mesures haute fréquence et haute résolution/haute densité spatiale.....	7
4. Maintien de capacités RH et techniques pour la production des données	8
5. ADN environnemental/métagénomique/Approches génomiques et post-génomique	9
6. Capteurs en conditions extrêmes, suivi des évènements extrêmes : Site isolés/sites frontières/ <i>hot spot</i>	9
7. Observation long terme/site d’observation.....	10
8. Les outils de caractérisation à petite échelle.....	11
9. Conservation des échantillons naturels/Analyses en matrices complexes	11
10. Nouveaux (?) objets d’étude/ nouveaux outils nécessaires ?	12
Autres idées :.....	12
B. Services et entrepôts	13
1. Data Terra et les pôles de données dont THEIA/ rôle des OSU - paysage en construction à partir des entrepôts existants.....	13
2. Interopérabilité inter-SIC mais aussi inter Système Terre et Environnement	14
3. Besoin en observation - notion observatoire.....	14
4. Les données produites par des tiers	14
5. Cas des services et données spatiales.....	15
6. RH associées et compétences à développer	15
7. Vers une meilleure utilisation des données.....	16
Autres points :	16
C. Outils et modèles	17
D. Actions phares et jalons.....	19
E. Besoins éventuels à discuter et à qui ils doivent être adressés	20
F. Expliciter les potentielles zones de recouvrement avec d’autres ateliers	21
3. Aspects transverses.....	23
4. Éléments éventuels pour alimenter le bilan des dernières prospectives	23

1. Mode de fonctionnement de l'atelier

Le travail de l'atelier a principalement reposé sur une analyse des contributions recueillies lors de la première phase des prospectives. Les membres du groupe se sont répartis le travail selon les trois sous-thèmes : mesures et instrumentations, service et entrepôts, outils et modèles. Des réunions d'avancement de l'analyse se sont tenues chaque jeudi, durant le mois de novembre. Des mails ont pu être envoyés directement à l'animateur du groupe par des contributeurs, et le groupe s'est étoffé au cours de cette période. L'animation du groupe s'est faite principalement par échanges de mails entre les membres du groupe, et par la participation aux réunions hebdomadaires animées par groupe en charge de l'organisation des prospectives. Enfin, deux réunions de travail sur le document de synthèse préliminaire se sont déroulées les 20 et 21 décembre avant mise à disposition à la communauté. Un document de travail collaboratif a été mis en place pour faciliter le recueil des contributions à partir du 22 décembre. Une première version de la fiche de synthèse préliminaire a été mise en ligne le 22/12/2023, accessible sur le site des prospectives (<https://prospective-sic.sciencesconf.org/resource/page/id/13>), permettant à la communauté de commenter et de compléter le document. Enfin, le groupe de travail a organisé un webinaire le 8 janvier 2024 de 14h00 à 17h00, ouvert à l'ensemble de la communauté pour un premier retour sur la synthèse produite par le groupe données en SIC.

2. Contribution scientifique - Constats

L'acquisition de données est un élément-clé de toute recherche innovante, et le domaine SIC y est particulièrement sensible compte-tenu de la pluridisciplinarité des travaux qui y sont menés (Bio-Géo-Physico-Chimique), des périodes temporelles parcourues (de la milliseconde au millénaire) et des échelles spatiales investiguées (du nanomètre à la centaine de kilomètres), aussi bien issues d'observations de terrain, d'expériences en laboratoire ou à partir de modèles. Ces données concernent entre autres, la biodiversité, les activités anthropiques, le climat, l'hydrosphère et la géosphère superficielle, et bien entendu, les interactions entre ces compartiments, comme les interactions biotiques-abiotiques..

Tansley (1935) et Lindeman (1942) ont défini les écosystèmes comme le système indivisible de biota et de leur environnement, où les cycles organiques et inorganiques sont indissociables, s'organisant autour de flux de matières et d'énergie. Ces interactions complexes, qui régissent le fonctionnement des socio-écosystèmes nous invite à faire évoluer nos pratiques de recherche vers **le couplage et l'intégration** de l'ensemble de ces données (approche systémique / *whole system approach*). Enfin, le triptyque **Observation / Expérimentation / Modélisation** est clairement un des fondamentaux de la recherche et de la production de données en SIC, avec des objets et des sites d'études qui prennent leurs racines dans des milieux naturels extrêmement variés dont certains sont clairement soumis à des évolutions rapides et/ou des stress importants (changement climatiques, pressions anthropiques), voire promis à des bouleversements certainement irréversibles. Ces enjeux autour de l'habitabilité de notre planète et des pressions exercées par les activités humaines renforcent l'importance de produire des données foncièrement multidisciplinaires de qualité, qui couvrent de manière la plus exhaustive possible tous les compartiments des surfaces continentales, de les utiliser dans des modèles de plus en plus complexes afin de prédire au mieux l'évolution des milieux, et de les mettre à disposition des différents acteurs de ces territoires et plus généralement à l'ensemble des citoyens.

Dans la suite de ce document consacré aux données en SIC, nous avons regroupé l'analyse des contributions et des différents documents accessibles sur le site des prospectives SIC (<https://prospective-sic.sciencesconf.org/ressource/page/id/6>), en trois grands thèmes :

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

A. Mesures et instrumentations

Concernant les moyens instrumentaux, les méthodes d'observations et d'analyses, ou les développements instrumentaux qui pourraient être envisagés pour soutenir la production de données en SIC, les contributions montrent plutôt une tendance à consolider des approches déjà utilisées par la communauté, ou de poursuivre le développement d'outils ou de méthodes déjà existants, avec une prise en compte nécessaire des enjeux environnementaux associées à nos pratiques. Quoiqu'il en soit, plusieurs contributions mettent l'accent sur la nécessité de poursuivre, voire d'amplifier une caractérisation fine des écosystèmes, de leur fonctionnement, et des processus mis en jeu, en particulier avec des mesures in-situ, et des pressions anthropiques qu'ils subissent. Et ceci doit se faire en diminuant notre impact environnemental (moins de consommation énergétique, des équipements réparables et adaptables, éco-conçus, moins de déplacement sur site, recyclage et fin de vie des instruments ou des capteurs).

Les contributions des communautés montrent un paradoxe : d'un côté, le souhait de consolider les approches existantes pour raffiner la caractérisation des systèmes naturels et anthropisés, et d'un autre côté, celui d'un changement radical dans la manière d'observer. En effet, les contributions font émerger plusieurs besoins prégnants : adapter les outils à des conditions réelles in situ (diminution du support technique, adaptabilité de l'instrument terrain), donner un sens aux informations indirectes, diminuer notre impact environnemental (enjeux énergétiques, de réparabilité, d'éco-conception, de recyclage) et d'éthique. Ces défis mettent en avant la nécessité de changer de paradigme sur la manière d'appréhender l'instrumentation, qui doit être construite autour et avec des communautés expertes non issues des SIC, à partir d'un cahier des charges définis par des besoins SIC. Ainsi, développer l'instrumentation en SIC apparaît comme un moyen de reprendre en main l'avenir de nos thématiques en renouvelant les approches. L'exemple des variables essentielles est saisissant : qu'elles soient climatiques ou de la biodiversité, leur définition relève d'un consensus au sein de la communauté scientifique. Ce consensus vise à établir des preuves empiriques nécessaires pour documenter, comprendre et gérer l'évolution du climat et de la biodiversité. Cependant, il est important de noter que la pertinence d'une observation qualifiée d'"essentielle" doit être équilibrée par la faisabilité de la mesure. Autrement dit, cette mesure doit être réalisable à l'aide de méthodes éprouvées in situ, économiquement viables et durables dans le temps. Cela met clairement en lumière le rôle transformationnel des facteurs technologiques, ainsi que de leur appropriation, dans l'évolution des objectifs de recherche et de suivi des SIC

La question de l'apport de la technologie pour répondre aux enjeux de l'observation et de l'expérimentation en SIC est au cœur des thématiques portées par de nouvelles communautés construites autour du réseau thématique des capteurs en environnement (RTCE, réseau métier de la MITI) et de l'Equipex+ TERRA FORMA. Bien que les contributeurs considèrent que ces dispositifs

d'animation soient suffisants, il apparaît important de favoriser des actions de formation avec les technologues pour mieux identifier la portée des nouvelles technologies pour nos thématiques.

1. Développements instrumentaux/méthodologiques

Nos actions de recherche s'appuient sur plusieurs types d'outils : l'instrumentation en laboratoire qui implique notamment des besoins de précision et de complétude, l'instrumentation *in situ* dont les besoins exprimés se recentrent sur des outils adaptés au terrain qui permettent une caractérisation plus fine des phénomènes et des processus, et la télédétection spatiale ou aérienne. Des besoins émergent pour bien articuler ces trois approches complémentaires, qui impliquent une coordination par un ensemble de spécialistes de disciplines différentes.

Instrumentation de laboratoire

Les techniques de datation des archives sédimentaires, ou de géochronologie sont un sujet de développement (isotopes cosmogéniques, ^{14}C , U-Th, OSL, ESR, ...) avec des applications qui concernent maintenant des minéraux supergènes (kaolinite, hématites et goethite, oxydes de manganèse). Un manque d'équipements en OSL est noté. Des financements pour des développements méthodologiques sont d'ailleurs souhaités sur ces techniques. Une contribution demande d'améliorer l'accès et la disponibilité des outils de caractérisation d'archives sédimentaires de type CTscan, bancs photographiques,... voire à structurer nationalement ces moyens. Une première étape pourrait être de réaliser un bilan de l'existant et des conditions d'accès à ces équipements.

Au cours des dernières années, l'IR REGEF est apparue dans le paysage CNRS Terre & Univers, avec une partie certes encore limitée, mais qui concerne des équipements dédiés aux SIC. Cette structuration qui permet entre autres des échanges entre utilisateurs d'équipements ou de techniques d'analyses, offre un cadre censé favoriser le maintien, le renouvellement et l'évolution des moyens analytiques.

Est-ce que les SIC doivent s'impliquer plus dans cette IR ?

D'autres IR « hors » SIC, sont-elles également à investir (ex Résif) ?

Instrumentation in situ

Les réseaux de capteurs in situ sont considérés comme des instruments de surveillance automatisés en continu d'une zone spécifique, au sein de laquelle il faut décrire une certaine variabilité spatiale. Leur développement vise à compléter les données recueillies par des observateurs humains, à rationaliser les méthodologies d'observation, à automatiser des tâches répétitives ou dangereuses, et à signaler des conditions spécifiques nécessitant une intervention humaine. Si la transmission des données favorise la maintenance préventive, la présence sur site reste nécessaire pour assurer le bon fonctionnement, remplacer les capteurs et les étalonner le cas échéant.

Si plusieurs contributions évoquent les capteurs *low-cost*, connectés ou non, rien n'est indiqué sur les types de capteurs désirés, ni sur les spécificités techniques et opérationnelles. Il faut cependant noter que cette question est l'une des thématiques portées par l'Équipex+ TERRA FORMA, ou régulièrement

un des sujets des échanges au sein du réseau RTCE, et peut-être que l'ensemble des personnes concernées trouvent dans ces dispositifs le cadre et l'animation suffisante aux développements et usages de cette catégorie de capteurs. Les capteurs *low-cost* sont principalement demandés dans le cadre de l'augmentation de la résolution spatiale et temporelles des observations (hautes fréquences, hautes densités), afin d'avoir une caractérisation plus fine des phénomènes et des processus, notamment les événements extrêmes (exemples crues, inondations, glissement de terrain ...). Il est important de préciser que les capteurs *low-cost* ne doit pas impliquer une perte dans qualité de la donnée, mais un coût globalement moins important que des équipements commerciaux, aussi bien dans leur conception, leur fabrication, mais aussi dans leur usage (consommation électrique) que dans leur coût environnemental (plus facile à réparer, ouvert et évolutifs, recyclables).

De manière plus générale, les besoins et développements de capteurs *low-cost* portent sur des équipements de mesures et de caractérisation physico-chimiques des milieux aqueux (pH, température, conductivité, turbidité), sur des analyses électrochimiques, sur la mesure de l'humidité et les flux de gaz des sols (GES entre autres), et sur des capteurs atmosphériques. L'imagerie hyperspectrale reste également un sujet de développement, en particulier pour des facilités d'acquisitions sous drone.

Plusieurs contributions demandent plus d'outils de mesures dédiés au cycle du Carbone, afin de documenter le cycle de cet élément. Le cycle pouvant être lié à des variations importantes et rapides des stocks (par exemple dans le cas de périodes de dégel de pergélisol, ou d'incendies de forêt), des mesures CO₂ et CH₄ avec une haute fréquence d'acquisition sont nécessaires.

Peu voire aucune contribution mentionne des capteurs permettant de caractériser l'activité microbiologique, pourtant essentielle au contrôle des flux de carbone et nutriments

La micro-fluidique est une compétence à développer dans nos communautés afin d'améliorer certains dispositifs d'analyses chimiques in situ, par exemple dans le cas du suivi de GES en milieu urbain, ou de la collecte des bio-aérosols.

Le traçage de sources de polluants, d'éléments ou de contaminants est une des problématiques du domaine SIC, et le développement d'approches multi-traceurs est demandé.

Au niveau méthodologique, les stratégies de prélèvements et d'analyse, et la coordination de mesures par des spécialistes de disciplines différentes (chimistes, physiciens, géographes, sédimentologues, biologistes,) sont des champs à améliorer.

La problématique du biofouling pour les suivis en milieux aquatiques (eaux douces et marin) reste très contraignante pour certains paramètres (ex : PAR, pH,..) et les solutions techniques proposées ne sont pas toujours idéales, en particulier en milieu isolé (sans possibilité de maintenance régulière ou de sources d'énergie importantes permettant d'utiliser des systèmes de nettoyage automatisés).

Concernant l'ensemble de ces développements, il apparaît indispensable de souligner et de soutenir le projet ResCapE, porté dans TERRA FORMA, qui a pour objectif de construire un catalogue de solutions matérielles et logicielles ouvert à la communauté. Cet outil pourrait éviter de reproduire des solutions déjà existantes, et de palier les manques de compétences ou de ressources humaines de certaines unités. Un catalogue de réalisation a déjà été initié dans le domaine AA, piloté par la CS IIT.

Mesures satellitaires et aériennes (télédétection)

L'apport des mesures satellitaires en comparaison avec des données de terrain reste d'intérêt pour la communauté SIC :

Les données de télédétection sont devenues indispensables en hydrologie, suivi de la végétation, nature des surfaces, température, humidité, activité chlorophyllienne, topographie, ou encore dans l'étude du cycle du carbone... D'autres thèmes émergents : l'urbain, le littoral, les transitions agricoles en termes de description et la santé sans doute, (One health ...)

Les qualités (couverture spatiale large et de plus en plus complète, possibilité du multi-échelle avec des résolutions spatiales qui s'améliorent, et des visites temporelles qui s'améliorent beaucoup également)

Les types d'utilisations se diversifient : description, compréhension par croisement de données (géostatistiques, IA) ou en entrée des modèles, et aussi pour valider les modèles

Finalement, la télédétection est extrêmement utile pour caractériser la co-évolution des pressions humaines et des systèmes naturels, qui sont au cœur des problématiques SIC.

Sur les moyens aéroportés plus spécifiquement, de type drone, il convient de souligner le travail actuellement en cours par le GT 4D INSU/SIC. La réflexion porte sur les équipements, mais aussi les moyens de proposer une structuration nationale de mise à disposition de matériel et des personnels compétents associés ; ainsi que les traitements impliqués par ces observations, qui nécessitent des développements d'algorithmes dédiés mais aussi peut-être, un accès à des ressources numériques de calcul ainsi que des espaces de stockage / point d'accès centralisé sur l'existant pour faciliter la recherche de données.

Au-delà de ces trois aspects, d'autres constats sont partagés au sein de la communauté.

2. Maintien des capacités d'observations et d'analyses

Concernant certaines opérations liées à l'observation in situ, la question de l'externalisation de certaines tâches (installation de certains équipements, entretien de capteurs, changement de batteries, contrôle du bon fonctionnement des installations, ...), pourrait se poser afin de compenser la diminution des moyens humains. On peut citer l'exemple des installations effectuées pour les sites des réseaux de l'IR Epos-France, notamment les sites des réseaux sismologique et géodésique de l'ex-IR Resif, installations définies par les scientifiques, conçues et installées par les observatoires et parfois quelques entreprises privées. Ce type de démarche peut contribuer à l'harmonisation des outils par la formalisation nécessaire des attendus. Un autre avantage est de réserver les RH sur les sujets à développer, avec une plus-value technique et/ou scientifique. La question du chemin de la donnée est importante car certaines données comme les données météorologiques par exemple, peuvent se retrouver à différents endroits.

3. Mesures haute fréquence et haute résolution/haute densité spatiale

Les mesures à haute résolution spatiale et temporelle permettent d'étudier plus finement les processus - une résolution locale pour répondre aux enjeux et questions locales, et selon une approche globale de certains modèles - et d'atteindre de nouvelles données originales en particulier dans les conditions d'événements extrêmes - enjeu d'asservir et de contrôler/automatiser les capteurs (notion de réveil) pour augmenter la fréquence lors des événements extrêmes, et pour contrôler le bon fonctionnement des dispositifs d'observation. Notamment ces mesures à haute résolution spatiale et temporelle sont désormais possibles grâce aux développements d'outils/capteurs *low-cost* permettant

un déploiement massif. On retiendra également que ces mesures à fines échelles permettent d'optimiser ou ajuster le design de protocoles d'échantillonnage à plus grande échelle.

4. Maintien de capacités RH et techniques pour la production des données

Les contributions montrent avant tout un besoin en personnel pour maintenir et continuer aux développements des capacités d'observation et de mesures in situ indispensables à nos activités de recherche sur les socio-écosystèmes. Il s'agit au minimum de maintenir les compétences actuelles, et de renforcer les compétences associées à certains métiers avec quelques points saillants :

- *Compétences dans les mesures de terrain/observation.* En plus d'avoir des personnels qualifiés et experts dans la mise en place de dispositifs de mesures et dans la gestion des sites d'observation ou de la logistique associée à certains sites isolés comme les zones subantarctiques (TAAF) ; des personnels sachant traiter le continuum capteurs/données/entrepôts seraient certainement un plus pour les activités de recherche en SIC. Parmi les compétences qu'il faut également faire progresser, les aspects réseau de communication, et les compétences en instrumentation de manière très large, en particulier pour adapter des dispositifs ou capteurs (par exemple développer des interfaces robustes pour des capteurs du commerce), et/ou réaliser des montages à partir de composants sur étagère (interfaçage, intégration de capteur, ...), avec un volet métrologie qui devrait permettre de garantir une bonne qualification des données (problème d'inter-calibration des instruments, étalonnage, utilisation de standard, suivi et maintenance sur le long terme des équipements). Avoir des personnels capables d'interagir aussi bien avec des technologues que des scientifiques de disciplines différentes/thématiciens, est aussi un volet à développer, comme cela a pu être identifié dans TERRA FORMA.
- *Favoriser les échanges de compétences et de retours d'expériences* entre les personnels techniques, et Chercheurs/Enseignants-chercheurs engagés dans des observations. Les OSU représentent certainement un cadre favorable à un premier niveau opérationnel et de réseautage pertinent à développer sur ces thématiques de développements instrumentaux. La CS IIT, commission transverse CNRS Terre & Univers dédiée à l'Instrumentation Innovante et Transverse, peut contribuer à un meilleur transfert des connaissances et de technologies entre les grands domaines de l'institut. L'appel à projet annuel sur les développements instrumentaux pourrait être encore plus utilisé par les SIC. Enfin, les réseaux métiers tels que RTCE ou MAPI favorisent aussi les échanges de pratiques et de compétences. Au-delà des personnels techniques, les chercheurs et enseignants chercheurs pourraient y être plus nombreux.

Quel rôle pour la DT INSU dans ses partages d'expertises avec les agents des unités impliqués dans les observatoires ?

- Des besoins sont également exprimés pour des chimistes afin de soutenir et développer les capacités analytiques indispensables à nos recherches.

Un des enjeux pour l'avenir sera d'être en mesure d'intégrer la chaîne qui va de l'expression du besoin (quelle mesure avec quel outil) à la mise à disposition, au partage et à l'utilisation/appropriation des données produite ; en passant par la conception, la mise en œuvre, la collecte des données, leur transmission, leur validation et leur analyse. De nombreux métiers techniques et scientifiques doivent de plus en plus intégrer des aspects amont ou aval à leur cœur de métier.

Comment favoriser et entretenir l'adhésion cette chaîne ?

Doit-on créer de nouveaux métiers avec un volet données plus intégré ?

Concernant les sources de financement, si EC2CO est apprécié pour soutenir des projets de développements instrumentaux, il semble que l'appel à projet de la CS IIT ne soit pas encore bien connu et utilisé en SIC. C'est certainement une piste de progression, comme la participation aux AEI (Ateliers Expérimentation et Instrumentation) organisés tous les deux ans. La DT INSU a su élargir ses compétences au domaine SIC ces dernières années, et être attentive aux besoins exprimés. Il reste certainement une marge de progression dans l'utilisation de ces précieuses ressources humaines et de ces compétences techniques.

Enfin, même si nos équipements ne sont pas conséquents, la question de structurer des parcs d'instruments (en particulier pour les outils d'observation sur le terrain) pourrait se poser à l'instar de ce qui se fait dans le domaine OA par exemple. Ou un outil commun permettant d'avoir une connaissance des équipements et des compétences associées dans chaque unité serait déjà un gain important (création d'un "Tinder outils SIC"). L'exemple du forum du réseau RTCE est un outil intéressant à regarder pour favoriser les échanges entre instrumentalistes.

[Est-ce que l'IR REGEF peut contribuer à traiter ce besoin ?](#)

5. ADN environnemental/métagénomique/Approches génomiques et post-génomique

Les approches génomiques et post-génomiques, tout comme l'étude de l'ADN environnemental, sont des outils très pertinents pour l'étude des perturbations des écosystèmes au travers de l'analyse du comportement, des capacités d'adaptation et d'évolution des organismes présents dans les milieux. Mais ces moyens restent coûteux et pas encore assez nombreux semble-t-il. Si certaines plateformes existent, parfois dans d'autres organismes comme l'INRAE, ou dans d'autres instituts du CNRS, la question de développer des plateformes dédiées au SIC pouvant traiter à l'échelle nationale des échantillons se pose. Avec l'intérêt particulier de développer des méthodologies d'analyses propres aux matrices naturelles variées rencontrées dans les SIC. Il reste d'ailleurs à bien connaître les biais éventuels impliqués par la nature de cette matrice (sol, eau, sédiments, ...) sur l'analyse de l'ADN environnemental. À cela s'ajoutent des moyens informatiques associés, et des compétences qui doivent être développées en biologie moléculaire, en bio-informatique ou en bio-statistique, dont le déficit est un frein avéré au développement de ces outils dans les SIC. La possibilité de développement de séquenceur de terrain et/ou de capteur omique a été évoquée.

6. Capteurs en conditions extrêmes, suivi des évènements extrêmes : Site isolés/sites frontières/hot spot

Si les contributions ne font pas toujours clairement apparaître des besoins en instruments spécifiques à ces milieux, certains environnements, à cause de leur fragilité par rapport au changement climatique, aux fortes pressions anthropiques qui s'exercent sur eux, de par la gestion des risques qui leur est associé, ou encore à cause de la méconnaissance de leur rôle dans certains cycles ; sont des sites d'étude d'intérêt pour la communauté SIC. L'intérêt de ces sites ou milieux peut aussi être malheureusement, le caractère irréversible des basculements qu'ils vont subir dans les prochaines années. On peut citer par exemple les villes côtières du sud, les mangroves, les zones humides, les zones de hautes latitudes, les milieux insulaires, les estuaires souterrains, les régions polaires, ou encore les métropoles en général. Dans le cas des estuaires souterrain, ou des sites de stockage souterrain, des développements d'instruments capables de travailler à haute pression sont attendus.

De même, pour les sites isolés géographiquement, le développement de moyens de communication robustes est indispensable, comme ce qui est réalisé dans le projet WiSeNet avec le

protocole LoRaWan (communication longue distance), et en conciliant également des objectifs de consommations les plus réduites possibles en accord avec une recherche qui se veut de plus en plus frugale. Il s'agit donc :

- de faciliter la collecte des données avec des capteurs communicants pour tout ou partie des données (brutes ou synthétisées/élaborées) ;
- de travailler sur le fonctionnement en réseau de capteurs, parfois pour des mesures très différentes sur un même site (ce qui, implique pour des sites isolés une polyvalence certaine des opérateurs) ;
- de pouvoir asservir le capteur pour enregistrer un phénomène spécifique, ou contrôler son bon état de fonctionnement.

Pour certains de ces sites, il est nécessaire de prévoir une instrumentation adaptée à des milieux/événements extrêmes sans être détruite, par exemple aux basses températures ou pouvant résister à des variations importantes de débit dans un cours d'eau, ou au phénomène de biofouling. Ainsi, il faut développer des outils de mesures de concentrations ou de flux des éléments (Fe, N, P, C) pouvant être implantés dans des régions polaires ou subpolaires. Il convient aussi de penser à la formation des agents qui interviennent dans ces milieux extrêmes, et aux problématiques logistiques spécifiques à ces sites isolés et/ou hostiles (par exemple moyens de navigation).

Enfin, si les observations ne nécessitent pas toujours de nouvelles avancées technologiques sur la physique des capteurs, il est souvent indispensable de travailler sur l'adaptation de technologies sur étagère à nos milieux d'étude et/ou à nos échantillons.

Les progrès restent à faire quant à l'acquisition de données sur les événements extrêmes, notamment dans des contextes insulaires ou isolés :

- Problème de tenue des instruments lors d'événements extrêmes, ou dans des conditions de pression, de température, d'humidité, ... qui sortent des conditions habituellement rencontrées en France hexagonale. La communauté a besoin de poursuivre les développements ou adaptations d'outils ou d'instruments qui puissent résister et continuer à acquérir des données de bonne qualité même dans des conditions météorologiques inhabituelles, qui sont de plus en plus fréquentes et marquées (tempêtes, incendies, crues, sécheresse), ou qui puissent enregistrer des données qui ponctuellement vont être hors gamme ;
- Comment enregistrer l'événement au bon moment et avec la bonne fréquence ? L'augmentation de la fréquence des enregistrements est une des pistes envisagées pour ne pas passer à côté des événements extrêmes (une autre piste est l'asservissement d'un système d'acquisition haute fréquence par un système d'acquisition basse fréquence : par exemple l'enregistrement haute fréquence de variables d'une rivière en crue à partir du moment où il y a dépassement de seuil d'un cumul (ou d'une intensité pluviométrique ou d'une hauteur d'eau de rivière) mesuré à plus basse fréquence). De même, la couverture spatiale plus dense de certains milieux devrait permettre une meilleure description de ces épisodes. (cf. paragraphes sur les mesures HF)
- La flexibilité nécessaire dans le suivi de ces événements est parfois limitée par des cadres administratifs qui contraignent les agents dans leurs missions.

7. Observation long terme/site d'observation

Tout le monde s'accorde sur l'obligation de maintenir des moyens d'observation long terme, avec des séries de mesures décennales à pluri-décennales

Les SNO (21 observatoires), et ZA (15 ZA) et au total près de 150 sites instrumentés, apparaissent comme des sites/dispositifs adaptés aux enjeux de production de données, sans compter les observatoires relevant uniquement de l'INRAE, de l'IRD, de l'ANDRA ou du BRGM par exemple. Toutefois, des demandes de création de nouveaux observatoires dans les régions subantarctiques (TAAF en lien avec IR OZCAR ?), et sur certains environnements spécifiques (mangrove, estuaire) sont faites, en soulignant l'enjeu de regrouper des équipes interdisciplinaires sur ces sites, dépassant les disciplines classiquement rencontrées dans nos observatoires (économistes, profession de la santé, génie civil, ...).

Doit-on réduire le nombre d'observatoire pour compenser le manque de moyens humains et/ou l'augmentation des tâches à effectuer (travail sur la gestion des données par exemple) ?

Il y a aussi un besoin de continuité de tout type de mesure (in situ et télédétection) malgré les évolutions techniques des capteurs (méthodes d'homogénéisation) et les baisses d'investissement RH.

8. Les outils de caractérisation à petite échelle

L'acquisition de données expérimentales à l'échelle moléculaire reste un enjeu pour documenter les mécanismes physiques, chimiques et biologiques qui pourront ensuite être répercutés aux échelles supérieures. Parmi les outils ou instruments qui demeurent nécessaires et en constant développement, on peut citer :

- Les expériences sur grands instruments (Synchrotron) pour appréhender par exemple des mécanismes aux petites échelles, ou caractériser des contaminants à de très faibles dilutions. La ligne FAME UHD (ligne CRG), est un bon exemple d'équipement qui permet des investigations dans des échantillons très dilués (HERFD-XAS - *high energy fluorescence detected X ray absorption spectroscopy*). Des développements sont attendus sur d'autres techniques telles que l'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*). Le X-FEL (*X-ray free electron laser*), permettrait ainsi d'effectuer des analyses dynamiques à l'échelle temporelle à la nano picoseconde. Ces techniques restent encore trop peu utilisées par la communauté SIC. Pourquoi ?
- La microscopie électronique à très haute résolution
- L'utilisation de techniques d'analyse à l'échelle submicronique dédiées à l'étude des mécanismes moléculaires de la dynamique du Carbone (STXM, MET, NanoSIMS ...) qui implique souvent un challenge dans la préparation des échantillons.
- Le développement d'outils permettant des analyses à l'échelle de la cellule (analyse d'image, imagerie photonique, confocal), avec des analyses résolues spatialement, en mode *single cell*, des mesures phénotypiques cellulaires ou des mesures isotopiques à l'échelle cellulaire. De même le développement des techniques de caractérisation moléculaire de la matière organique est souhaité.

9. Conservation des échantillons naturels/Analyses en matrices complexes

Il s'agit ici des développements nécessaires pour conserver lors d'analyses en laboratoire, les conditions du milieu naturel (exemple de minéraux sensibles aux conditions redox), ou de conserver l'intégrité des prélèvements (texture, organisation, état physiologique, ...). Par exemple la conservation des carottes de sol ou de sédiments pour effectuer des expériences en laboratoire. Par

exemple, la préservation des particules colloïdales prélevées sur le terrain en suspension dans l'eau ou provenant du sol, reste un sujet pour obtenir des caractérisations pertinentes de ces objets très réactifs dans l'environnement. Des besoins sont exprimés sur des regroupements de carothèque par exemple, facilement accessible à l'ensemble de la communauté, comme par exemple la cybercarothèque (<https://cybercarotheque.fr/>). Il existe des projets d'aquathèque par exemple dans le PEPR One Water, et on parle aussi de sédimentothèque. Ce point peut également contribuer à une science plus frugale au travers d'une meilleure utilisation partagée des échantillons.

Les analyses de contaminants dans des matrices naturelles plus ou moins complexes (comme pour les analyses génétiques citées plus haut), sont toujours un sujet de développement à faire progresser, par exemple en ce qui concerne la sensibilité de détection de micropolluants. De même, l'amélioration de la quantification des molécules organiques, par exemple dans des matrices variées (eau, sol, sédiment, biote) est toujours un enjeu.

10. Nouveaux (?) objets d'étude/ nouveaux outils nécessaires ?

- Holobionte, microbiote ;
- Bioaérosols ;
- Les contaminants métalliques associés aux nouvelles technologies (Ge, Li, Sb, les Terres Rares)
- Les particules issues de l'érosion et de l'altération des bâtiments et structures urbaines, ainsi que les terres excavées
- Les virus

Autres idées :

- Les proxies : le besoin de définir de nouveaux proxies, par exemple pour le cycle du Carbone, proxies facilement mesurables pour suivre des mécanismes identifiés à des échelles submicronique par exemple. Des proxies hyperspectraux pour l'origine des matériaux et des différentes formes du carbone particulaire, des proxies chimiques et biologiques pour le traçage de sources de nutriments, de matières et de polluants.
- Le développement de nouveaux bioindicateurs, de définir de nouveaux modèles biologiques.
- Point sur l'utilisation des mésocosmes (5 citations sur 93 contributions)

De manière ponctuelle, des développements sont demandés/décrits pour :

- des capteurs basés sur des biosenseurs bactériens ;
- des résistivimètres et des spectromètres laser pour des observations en écologie forestière et en hydrologie ;
- des instruments dédiés aux hautes pressions (études des sites de stockage souterrain) ;
- des améliorations dans la discrimination par les techniques de traçages isotopiques ;
- des échantillonneurs ou sondes passifs, avec des développements de nouvelles matrices et de méthodes d'extraction ;
- des dispositifs permettant d'accéder à la spéciation des éléments ;
- incubation d'échantillons tests sur le terrain, ou installation de microsomes in situ ;
- développer l'utilisation des méthodes spectroscopiques (UV-vis, IR, RMN) ;
- mieux évaluer les flux particuliers versus élémentaires, dans l'optique d'avoir de meilleurs bilans de masse à toutes les échelles, et aux interfaces telles que sols/hydrosphères, ou avec l'atmosphère ;
- encourager le développement et l'adaptation des moyens analytiques de datation ;

- le Biologging ;
- la mise en œuvre d'analyses chimiques non ciblées, afin d'avoir une empreinte chimique du milieu sans a priori sur ce que l'on pense trouver comme contaminants par exemple ;
- développer des capteurs électrochimiques pour le terrain.
- Informer la communauté des moyens de carottage ? Maintiens infrastructure, RH expertise, accès ? À noter l'évolution en parc national de la partie forage continental à l'INSU (<https://www.dt.insu.cnrs.fr/moyens-nationaux/carottage-continental/>)

B. Services et entrepôts

1. Data Terra et les pôles de données dont THEIA/ rôle des OSU - paysage en construction à partir des entrepôts existants

Data Terra au travers de son pôle THEIA a vocation à centraliser l'accès aux données/produits de données des différents acteurs de l'ESR à partir d'entrepôts au plus près des producteurs de données. (L'hébergement des données n'est pas du ressort direct de DataTerra. Le pôle THEIA donne des conseils en termes de thésaurus et d'API -aspects techniques- pour bon référencement dans le catalogue du pôle, et le catalogue de l'IR dans son ensemble vers l'écosystème RechercheDataGouv, et pour accès aux données facilité à tous).

Il apparaîtrait intéressant de disposer d'un catalogue global des services des OSU, matures et en construction, vers les SNO/ZA. Ces services développés principalement aux échelles locales sont au plus proches des observatoires et sont à même de dégager des tendances, besoins et conseils concernant les RH impliqués et la gestion des données en entrepôts. Les entrepôts locaux sont parfois les mieux adaptés aux données spécifiques (exemple données issues de mésocosmes) au contraire des entrepôts nationaux ou internationaux présentant des formalismes (métadonnées, format de données) moins adaptés.

L'IR Data Terra est très peu (voire pas) citée, et quasiment aucune contribution ne parle d'entrepôts de données, ou de science ouverte. D'expérience, les notions de *data paper*, de DOI et d'entrepôts semblent bien connues mais pas toujours pratiquées. En revanche, le paysage des entrepôts est complexe : DataIndores / EasyData pour les données de longues traines + ceux plus anciens (zenodo qui n'est pas TRUST, pangea) + plus récemment RechercheDataGouv, sans compter les entrepôts thématiques, et les entrepôts locaux à l'échelle des SNO, des OSU ou des universités. Il apparaît indispensable que ce niveau de gestion et de curation des données puissent bénéficier de ressources humaines en adéquation avec les enjeux, afin de jouer pleinement leur rôle dans l'organisation nationale des données, tout en assurant le soutien et la formation des agents dans les unités. Les outils informatiques, l'expertise et le conseil pour une organisation rationnelle de la e-infrastructure nationale, que propose Data Terra avec son projet GAIA DATA sont également à considérer.

Le peu de référence à la structuration des services et outils au niveau national dans les contributions nous questionne sur ce sujet : est-il déjà parfaitement intégré en SIC, ou pas encore pris en charge par la communauté ? En cours de construction (par exemple EasyData est très récent). Une fois la structuration stabilisée, un schéma expliquant les bonnes pratiques en termes de choix d'entrepôt serait utile pour les utilisateurs (choix en fonction du type d'observations (observatoire de long terme, expérimentation / projet de recherche, de/des organisme(s) financeur(s), de l'existence d'une organisation selon les thématiques, etc...

2. Interopérabilité inter-SIC mais aussi inter Système Terre et Environnement

L'interopérabilité des données, leur cohérence, reste un sujet pour la communauté. Si des entrepôts existent, gérés localement (OSU, SNO, Unité), ou nationalement (Data Terra et son Entrepôt de données de longue traîne EasyData, et le pôle thématique THEIA dédié aux surfaces continentales qui s'appuient sur les entrepôts des IR d'observations des SIC et des entrepôts de ses Centres de Données et de Services), avec des règles de dépôts sur les formats et les métadonnées associées, la multiplicité des mesures et observations effectuées, autant en nature qu'en qualité ou en fréquence d'acquisition, semble constituer encore un frein à l'utilisation la plus ouverte possible des données au-delà des personnes qui assurent leur production.

3. Besoin en observation - notion observatoire

Nécessité clairement et souvent indiquée de disposer de jeux de données sur des séries temporelles longues, décennales à pluri-décennales. Grand besoin en "observation" au sens le plus opérationnel/pratique. Et avec pour objectif idéal que ces données répondent aux contraintes suivantes :

- **Continuité dans l'espace** - Couverture aussi complète que possible de l'objet observé
- **Continuité dans le temps** - Fournir des données sans lacune (donnée non acquise = donnée perdue) sur la durée la plus longue possible
- **Diffuser les données le plus rapidement possible en temps-réel opérationnel** -Fournir des données sans retard
- **Diffuser des données de qualité** - Fournir des données exemptes de parasite et de biais

Comme pour les données, la « DOIsation » des protocoles pourrait favoriser l'échanges de bonnes pratiques d'observation.

4. Les données produites par des tiers

Les données produites par des producteurs (exemples à vérifier) avec une haute expertises (exemple les données de METEO FRANCE, de EDF, des espaces naturels protégés, de l'IGN, de l'ONF, de l'OFB, ,... ..)

=> développer l'idée de faciliter l'accès aux données produites par des établissements publics (mise à disposition sans condition) soit avec des conventions cadres (données dites sensibles, ex. flore-faune; EDF avec sa renationalisation récente) soit avec des portails d'accès aux données fonctionnels. Par exemple, l'accès aux données hydrométriques publiques est essentiel pour la recherche en hydrologie, mais le site Hydroportail qui remplace depuis début 2022 la banque Hydro est fortement dysfonctionnel. On notera que parmi les premières priorités identifiées par une partie du programme OneWater Data (du PEPR One Water), figure la mise à disposition FAIR de ces données de la banque Hydro, mais aussi des données sur les nappes. De manière plus générale, il apparaît important sur certaines thématiques comme le cycle du Carbone, d'inclure rapidement l'ensemble des organismes qui produisent des données sur un même sujet, et d'avoir une cartographie des entrepôt actuels qui sont dispersés. Il serait important de limiter, voire effacer les difficultés administratives entre établissements. Avoir un accès à des données des acteurs tels que les gestionnaires des ressources en eau, en particulier dans le milieu urbain. En effet, la réglementation impose par exemple des contrôles

réglementaires qui pourraient constituer des jeux de données intéressants en complément de certaines campagnes d'observation, en particulier pour le milieu urbain.

Est-ce que ce volet données « réglementaires » est traité dans le SNO Observil ?

=> aller plus loin sur l'idée de coconstruire les outils d'accès aux données sur l'exemple de l'IGN.

Les données issues de la société civile / des données en sciences participatives

- Soit sur des protocoles établis en concertation avec les scientifiques / dans le cadre d'une recherche action
- Soit sur des données issues des citoyens (exemple comptage de poissons) / sc. participatives = approche stat sur des grands jeux de données
- Soit des données générées indirectement (ex mise en route des essuis glace des voitures en ville pour avoir une répartition fine des précipitations)

L'enjeu se porte sur les méthodes de qualité à appliquer pour qualifier la donnée, avec parfois des manques dans sa spatialisation et la régularité de l'acquisition/animation. Les projets de type *Living Lab* sont peut-être un cadre à développer plus pour améliorer la qualité des données obtenues, et favoriser ainsi leur utilisation.

La communauté SIC a-t-elle besoin de REX sur le sujet/ et de méthodologies-bonnes pratiques partagées ?

5. Cas des services et données spatiales

Plusieurs contributions mettent l'accent sur l'utilisation des données issues du spatial, avec entre autres, les satellites Sentinel 1 et 2, plus récemment SWOT, ou les nanosatellites (exemple des 6 nanosatellites CYGNSS). En plus de couvrir de grandes zones d'observation, la résolution des observations s'est améliorée. Si le domaine AO est plus habitué à utiliser les données issues du spatial, il reste certainement à la communauté SIC à poursuivre la prise en main de ces ressources, même si ce sujet n'est pas foncièrement nouveau. L'intérêt des données spatiale est importante pour valider, tester, calibrer/étalonner ou alimenter des modèles.

6. RH associées et compétences à développer

Des besoins en Data-scientists, et de personnes pouvant prendre en charge de grands jeux de données et/ou d'images comme par exemple le traitement des données LIDAR, qui impliquent le développement d'algorithmes. D'un autre côté, l'évaluation des SNO et la prospective associée avaient clairement mis en évidence le manque de ressources RH dédiées à la gestion et à la diffusion des données d'observation dans certains observatoires.

Le développement de la chimométrie est également évoqué, comme une approche pertinente pour traiter des quantités importantes de données, en particulier pour des recherches de sources sans a priori. Rôle de la section 55 ? Quelles perspectives en termes de postes vers les SIC ?

Le besoin se situe en premier lieu sur les data manager pour OZCAR et RZA, et pour les SNO, et il convient de programmer les besoins selon les 3 profils suivants à un horizon de 10-15 ans (5 à 8 ans pour les PEPR actuellement / focus data manager)

- **Data Manager** (proche des données de la collecte à la curation en entrepôt), = avoir des profils de personnes qui connaissent bien les capteurs ! Est-ce que les agents qui sont directement impliqués dans la collecte des données, les CNAP en particulier, sont suffisamment formés ou accompagnés sur ces sujets ? La mise en binôme avec les experts en données pour monter en compétences et assurer cette tâche serait-elle une solution à envisager ?
- **Data Analyst** (capable d'extraire des données brutes à partir d'un existant (Big Data) pour en tirer des conclusions et développer des outils stratégiques),
- **Data Scientist** (spécialiste qui saura mettre en place des modèles prédictifs mathématiques et l'AI)

7. Vers une meilleure utilisation des données

+ Frugalité numérique / observationnelle ? enjeu sur le choix des données à conserver ou pas. La frugalité observationnelle, visant à faire les fonds de tiroirs des données déjà acquises (projet ALAMOD, Carbonium) et la volonté d'harmoniser les jeux de données, laisse à penser à un changement de pratiques à venir et à encourager.

+ Réflexions à mener sur la conservation des données. Comment fait-on pour mieux exploiter /réutiliser les données existantes, et qu'est-ce que l'on doit conserver. Par exemple aux évolutions des techniques.

+ Services à destination de tiers (organismes, agences, individus) : services climatiques dans le PEPR TRACCS, questionnement sur les méthodes de diffusion et appropriation de la donnée dans TERRA FORMA, et THEIA...

+ Formation des étudiants de France hexagonale et étrangers ? (exemple : accompagnement sur des volets de formation, des étudiants et personnels sur place)

Autres points :

- Problématique de la désagrégation (?) des données, par exemple météorologiques pour avoir une résolution spatiale plus fine, pour les milieux urbains par exemple, afin de modéliser ou prédire des événements à une échelle pertinente pour la gestion de crue, ou des îlots de chaleur
- Question intéressante soulevée dans les PGD : doit-on conserver les données brutes et/ou élaborées ? ==> c'est à la communauté scientifique de décider. On suppose que la donnée brute s'adresse à des "praticiens" ayant la même expertise et que la donnée élaborée s'adresse à ceux/celles dont l'expertise sur le sujet est secondaire (un usage de la donnée mais pas une connaissance fine). Particulièrement vrai dans les grands projets interdisciplinaires, mais pas toujours vrai.
- Nouvelles données : Données quantitatives et/ou qualitatives en SHS utiles pour les SIC (ex perception de la nature, perception de restauration ou d'aménagement). Lien avec les économistes, mais aussi les neurosciences.

C. Outils et modèles

Les besoins en modélisation concernent tous les domaines (hydrologie, agronomie, pollution des plastiques, biogéochimie, atmosphère etc.). Avec la caractéristique des SIC du besoin d'intégrer plusieurs approches (physiques, biologique, chimiques), et d'avoir la capacité de modéliser à grande échelle (par exemple le bassin versant), ou à des échelles plus locales (l'estuaire, le quartier d'une ville, un glacier). La demande d'avoir des modèles prédictifs et d'aide à la décision de gestionnaires locaux sur le territoire semble être un critère qui continue d'émerger. Si les modèles globaux restent nécessaires, la tendance à développer des modèles avec une résolution spatiale plus adaptée aux problématiques des socio-écosystèmes locaux est importante.

En général, les besoins portent soit sur le **développement de nouveaux modèles** dans le but de mieux appréhender les processus étudiés et venir à l'aide des décideurs publics, soit sur l'**amélioration des outils de modélisation** déjà existant. Un axe de travail pourrait être d'avoir un catalogue complet des différents modèles existants utilisés en SIC. La problématique du couplage/chainage de modèles existants pour aller vers de la modélisation plus intégrée (e.g. modélisation de la zone critique) reste un enjeu important.

L'amélioration de modèles est axée sur deux aspects principaux : l'**amélioration technique** (par exemple, développement d'une documentation adéquate, diminution des heures de calcul, risques "d'explicabilité" (de ce que j'ai compris il s'agit d'être en mesure d'expliquer le fonctionnement du modèle et s'assurer de la pertinence des résultats produits) des outils développés lorsqu'ils sont trop complexes) et l'**amélioration des processus** représentés. L'amélioration des processus se réfère à différents aspects : couplage de modèles, croissance de réalisme dans les processus représentés, interdisciplinarité, prise en compte des incertitudes des simulations et amélioration de l'assimilation de données à travers l'intelligence artificielle. Parmi les sujets d'amélioration qui ressortent le plus, on peut citer :

- la prise en compte de sites particuliers/hot spot qui peuvent avoir un poids sous-estimé dans certains modèles (comme par exemple dans le cas du cycle du carbone avec le rôle des estuaires, des tourbières, ou des sédiments lacustres), ou des barrages et des retenues d'eau qui peuvent constituer des spots d'émission de GES.
- l'amélioration à toutes les échelles temporelles et spatiales des modèles relatifs au cycle du carbone,
- l'intégration de données issues d'autres champs disciplinaires, telles que des données macro-économiques, ou sanitaires par exemple, ou encore de géophysiques.
- l'intégration des processus aux petites échelles (colloïdes, micro-organismes, interfaces minérales)

L'**intelligence artificielle** est vu comme ayant un potentiel très élevé pour certaines questions et applications (spécialement en tant qu'outils de prévision et d'émulation), mais aussi comme ayant des risques "d'explicabilité" et nécessitant notamment des expertises spécifiques. L'IA est très souvent/quasiment cité dans les contributions et semble susciter beaucoup d'espairs et de développements potentiels pour les modélisations (Optimisation de temps de calculs, exploration de paramètres pour la recherche d'optimums, construction de modèles de substitution, découvrir ou

prédire des couplages non identifiés), mais aussi pour l'IA embarquée comme aide à l'observation (prétraitement des données sur site, réguler l'acquisition des données en fonction des conditions du milieu), ou encore pour le traitement des données (Recherche d'anomalie sur des phénomènes observés).

Des demandes de soutien RH pour le développement de ces techniques/outils sont faites, qui pourraient être associées à la construction d'une plateforme d'échanges sur ce sujet, avec la difficulté de n'être pas compétitif sur le marché de l'emploi pour ses différents métiers. Les compétences demandées sont des informaticiens, des mathématiciens (se rapprocher de IINSMI), des développeurs logiciels, des ingénieurs de recherche pour les différents volets du travail numérique : développement de logiciels de calcul scientifique, optimisation des codes en HPC, portabilité et diffusion des codes. Il apparaît également nécessaire de favoriser le rapprochement entre les modélisateurs au sens large, et les personnels des différentes communautés présentes en SIC : géologue, sédimentologues, biologistes, physiologistes, géochimistes, hydrologues, physico-chimistes, ...

Quelle est la maîtrise de l'IA par la communauté ? Y-a-t-il un besoin d'acculturer la communauté SIC à ces nouveaux outils ?

Concernant les modèles aux petites échelles (moléculaires, aux interfaces minérale/membranes biologiques, à l'échelle particulaire ou colloïdale, ...), le problème de leur intégration aux échelles supérieures reste d'actualité, ainsi que l'augmentation de la durée et la taille des simulations (de type dynamique moléculaire) pour se rapprocher des systèmes réels, ou encore pour dépasser ou reproduire des systèmes hors équilibre.

Les contributions font apparaître les difficultés qu'ont les modèles pour traiter les événements extrêmes, ou accidentels, mais qui peuvent avoir un impact non négligeable sur certains cycles de nutriments, de contaminants ou du carbone. Par exemple, le besoin de développer des scénarios hors projections climatiques classiques, ou des événements comme des éruptions volcaniques, des crues, ou à l'inverse des périodes d'étiage. La communauté MSC (Modélisation des Surfaces Continentales) indique par exemple qu'ils ne sont pas bien préparés sur des événements de rivières intermittentes, ou de la fonte totale des glaciers. Cette difficulté est encore plus importante lorsque la résolution spatiale de l'évènement est petite, comme les cas des îlots de chaleur en ville, ou au niveau d'un estuaire. À l'inverse, certains mettent en avant la difficulté d'extrapoler des résultats locaux à des échelles globale.

Le couplage des modèles biosphère et modèles chimie-transport est un enjeu. En particulier, la prise en compte des activités biologiques au sens large reste un point de progrès pour les modèles. Avec entre autres, une meilleure intégration du rôle des micro-organismes, de leur potentielle adaptation phénotypique, ou encore les données de l'écophysiologie ou de l'écologie fonctionnelle. La capacité des micro-organismes à s'adapter et à évoluer ne semble pas encore prise en compte dans les modèles par exemple.

Un des challenges de la communauté en plus de bien connaître et partager les nombreux modèles qui existent, sera dans les prochaines années d'être en mesure d'offrir des services et des outils en dehors de la communauté SIC, en direction des gestionnaires ou des décideurs locaux, mais aussi en direction de la société civile afin de mieux faire comprendre l'importance de nos recherches. Dans cette dernière optique, la capacité des modèles à pouvoir prédire des évolutions des socio-écosystèmes à des échelles

régionales, locales, voire du quartier ou de la rue, tout en étant cohérent avec des modèles globaux du climat par exemple, est un sujet d'attention.

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

Est-ce que les modèles développés en SIC sont facilement accessibles et connus par l'ensemble des acteurs SIC et extérieurs aux SIC ?

La notion de *Digital Twin*/jumeaux numériques n'est présente dans les textes. Est-ce un outil pertinent pour la communauté ?

Autre points :

- Les modèles peuvent aussi être utilisés pour mieux préparer une campagne de mesures, ou l'instrumentation d'un site, par exemple en optimisant le nombre de capteurs, ou leur répartition spatiale.
- La pertinence des modèles est questionnée, car parfois, à partir de concepts faux ils permettent d'obtenir des jeux de données justes.

Comment valider les modèles ? Avec des études de sensibilité ? Méthodologie de calibration ?

Le besoin de modèles pour l'inversion de données de tous types (chimiques, thermiques, géophysique... du laboratoire au terrain) avec pour objectif d'exploiter au mieux (quantitativement) les données. Cela inclut des données intégrées qui contiennent plusieurs niveaux d'informations à extraire (caractérisation du sous-sol par exemple) et le besoin d'analyser la complémentarité des informations fournies par différents types de données. Les principaux verrous scientifiques pour cela sont (i) mettre en place des stratégies d'inversion adaptées au type de données considéré, (ii) développer des modèles directs assez efficaces en temps de calcul pour être utilisés dans ces stratégies d'inversion, (iii) utiliser les HPC et IA pour accélérer les temps de calcul de ces modèles directs, (iv) avoir des modèles directs à la physique cohérente pour ce que l'on souhaite caractériser (hétérogénéités structurales, suivi géochimique...). A cela s'ajoutent les difficultés de portage et de diffusion des codes développés pour les partager avec la communauté, et la difficulté d'avoir un suivi continu du développement de modèles qui sont mis en œuvre par des membres non permanents (post-docs, thésards...).

D. Actions phares et jalons

Nous proposons ici une liste provisoire et non exhaustive d'actions phares issues des contributions, ou des discussions du GT Données en SIC. Elle sera discutée et complétée lors de la session consacrée à cet atelier durant le colloque.

- **Action d'acculturation/formation de la communauté SIC à l'IA** et ses possibilités.

L'IA est clairement un nouvel enjeu pour l'ensemble des activités en SIC. Si son utilisation et le potentiel envisagé sont bien présents dans les prospectives, son usage embarqué ou dans l'aide à l'observation comme cela existe dans le spatial, n'est pas apparu dans les textes des contributions.

Doit-on envisager des actions de formations/d'acculturation à l'ensemble de la communauté sur ces nouveaux outils ?

- **Projet de ressourcerie des développements instrumentaux** à valoriser (TERRA FORMA), rôle de la CS IIT ? de la DT-INSU ?
- **Création d'un programme national dédié aux flux entre atmosphère et SIC** (dépôts et émission). Plusieurs contributions, dont celle du domaine OA, mettent en avant la nécessité d'améliorer les interactions entre les domaines SIC et Atmosphère.
- **Création d'un GdR modélisation RTM** spécifique à la communauté SIC.
- **Création d'une plateforme d'échanges entre mathématicien et modélisateurs** du domaine SIC.
- Création d'appel d'offre orienté pour les développements numériques
- Ouverture des appels d'offre existants (EC2CO, IMPT...) au numérique et aux Géosciences
- Acceptation que le numérique a un coût (besoin de prestations extérieures pour palier au manque d'ingénieurs en calcul scientifique, HPC, portage, et coût des supercalculateurs qui sont payants pour les utilisateurs dans certaines universités), et donc prévoir la possibilité de sous-traitance dans les AO.

E. Besoins éventuels à discuter et à qui ils doivent être adressés

Au travers des différentes contributions, il apparaît **très clairement et de manière quasiment systématique, le besoin de consolider, voire d'augmenter les ressources humaines**, entre autres, autour de l'acquisition des données sur le terrain et le maintien de dispositifs d'observation, dans la gestion et le traitement des données, et dans le développement et la mise à disposition des modèles.

Concernant les demandes RH associées aux travaux de terrain, soutien aux observations (mesure, maintien des capacités de mesure), une spécificité à des milieux ou événements extrêmes (ex crues extrêmes) est recherchée, comme par exemple pour les milieux arctiques ou antarctiques. Il s'agit également d'avoir des personnels chargés de la gestion et des acquisitions sur site, avec le souhait d'avoir des personnels multidisciplinaires et polyvalents, comme par exemple des d'ingénieur(e) de recherche en approches écosystémiques (ADN environnemental, isotopes, modélisation). Là encore, la prise en compte de l'impact environnemental doit devenir un socle à tous ces métiers. Les besoins sont largement partagés concernant le développement instrumental, et plus particulièrement celui destiné au terrain, avec des compétences recherchées en informatique, en électronique, en électromécanique, en instrumentation scientifique, en communication, et en interfaçage/intégration de composants ou de capteurs du commerce dans des dispositifs de mesure. Des demandes liées à des activités analytiques ou de laboratoire sont également remontées comme des ingénieurs en taxonomie benthique, en analyse chimique, ou en biologie moléculaire.

Il apparaît clairement à lecture des contributions un déficit sérieux dans les ressources humaines liées au développement et à la meilleure utilisation des données de type omiques, génétiques, ADN environnemental, post-génomiques. Il y a un très sérieux besoin de bioinformaticiens, de biostatisticiens et de manière plus globale, de data-Manager/Analyst/Scientist pour traiter ces grands

jeux de données, et les flux de données de plus en plus importants associés aux différents dispositifs d'observation.

Concernant les données et les modèles, comme cela a déjà été décrit précédemment, les demandes en RH sont également très fortes (compétences en informatique, développement de logiciel, mathématique, et les compétences de Data-Manager/Analyst/Scientist).

L'interdisciplinarité reste un sujet évoqué largement par la communauté. Comment mieux faire dialoguer les disciplines, à l'intérieur de nos communautés, mais aussi au-delà, avec par exemple des chercheurs/Chercheuses ou enseignant(e)s chercheur/chercheuses des SHS, des mathématiques, de la santé, du génie civil, de l'informatique ou de l'ingénierie. La piste de thèse plus longues pour permettre la formation à une discipline secondaire a été proposée.

F. Expliciter les potentielles zones de recouvrement avec d'autres ateliers

Atelier 1 : De nombreuses contributions insistent sur le milieu urbain, et l'opportunité offerte par le SNO Observil. Nous n'avons traité ici ce thème que sur les aspects instruments, données modèles, et pas sur les thématiques scientifiques qui seraient à développer dans l'avenir.

Atelier 3 : Beaucoup de questions recouvrent celles des observatoires, indispensables à conserver, ainsi que les nouveaux sites/milieus à observer. Cependant, compte tenu des moyens RH de plus en plus contraints, et des nouvelles missions confiées à ces observatoires ces dernières années (comme la gestion et la mise à disposition des données dans des entrepôts ouverts et respectant la « fairisation » des données, ou la structuration au niveau européen de certains sites), une réflexion douloureuse mais nécessaire sur l'abandon de certains sites apparaît inéluctable. Est-ce que le développement de moyens d'observation plus autonomes permettrait la poursuite d'observation et la collecte de données afin de ne pas perdre la continuité d'observations sur les sites les plus pertinents ?

Atelier 4 : Cet atelier exprime le besoin de développer des capteurs low-cost pour mieux appréhender les continuums, et compléter les chaînes d'acquisition fonctionnelles. Toutefois, il n'y a pas de liste de type de capteurs.

Atelier 5 : L'amélioration des interactions avec les SHS, au travers d'une meilleure intégration de leurs données, en particulier pour les modèles apparaît cohérente avec notre atelier. En revanche, nous n'avons pas insisté sur les demandes nombreuses de la nécessité et d'une amélioration des interactions avec les SHS.

Atelier 6 : Beaucoup de contributions sur la thématique du cycle du carbone avec des besoins en outils, en données et en modélisation (Capteurs in situ CO₂ et H₂). La dynamique en cours sur ce sujet est clairement sensible, en particulier au travers des nombreuses contributions qui abordent ce thème, et bien entendu de l'actualité du PEPR FairCarbon. Là encore, nous nous sommes restreints à traiter les aspects instruments/données/modèles sans décrire plus avant les objectifs scientifiques associés.

Nécessité de mieux intégrer/prendre en compte l'AI

Atelier 7 : La prise en compte combinée de l'impact des stressors environnementaux (physiques, chimiques) est fondamentale dans les questions qui touchent les questions liées aux contaminations et

aux pollutions, le devenir, l'impact et la définition de solution. L'enjeu mis en avant reste une caractérisation exhaustive, systématique et non ciblée, notamment pour définir l'exposome in situ, à comparer à des indicateurs biologiques de l'état de santé du milieu.

Au point de vue instrumental, cette question relève de la nécessité de définir les interactions entre eau, roche, gaz, nouvelles entités anthropiques et biota avec un point de vue « flux de matière », et cela, à des échelles de temps allant de l'évènement extrême au long terme. L'approche « réseau de capteurs hétérogènes » apparaît ainsi comme nécessaire. La contribution souligne également les besoins de développement d'outils dédiés, des systèmes intégrateur (gel) ou bien de capteurs dédiés. Sur ce dernier point, les défis techniques d'adaptation au terrain restent fondamentaux, les capteurs chimiques de très haute qualité ayant été développés dans les laboratoires souffrant, in situ, confrontés aux problèmes d'interférence et de biofouling).

Atelier 8 : Concernant les thèmes communs avec l'atelier données en SIC, les principaux éléments sont présents dans nos constats, avec un focus sur les outils nécessaires au développement de reconstructions paléo-environnementales, comme les méthodes de datations (ADN, palynologie, méthodes géochronologiques appliquées aux minéraux secondaires, et les méthodes de datation (U-Th)/He, déséquilibre U/Th, OSL et ^{14}C in situ. De même cet atelier met en évidence le besoin de données sur des périodes clés du quaternaire, et au-delà (Holocène, transitions glaciaires-interglaciaires, Paléocène-Eocène (e.g. Thermal Maximum)). Concernant l'utilisation des techniques de caractérisation à petites échelles, il est évoqué l'idée de les transposer à la caractérisation de la matière organique du sol, et de ses interactions avec les autres composants du sol. Une autre piste évoquée est de développer des approches simples pour caractériser la diversité fonctionnelle basée sur des traits.

Pour les données, les principaux constats rejoignent ceux faits plus haut. Comme par exemple l'intégration de dynamiques sociales dans l'analyse de évolutions futures, l'intégration de données dérivées d'imagerie satellitaires à haute résolution, ou encore l'utilisation de données nationales pour une définition plus précises de la spatialisation des usages.

Sur le sujet des modèles, des points techniques précis sont listés, qui méritent peut-être d'être ajoutés en compléments des points plus généraux abordés dans cet atelier Données en SIC (par exemple prendre en compte les avancées récentes dans les théories de nucléation cristalline, intégrer l'étude des colloïdes dans les modèles géochimiques, Faire le lien entre modèles spécialisés et ESMsActions, Développer la modélisation de la zone critique couplant transport-réactif et processus érosifs)

Atelier 9 :

L'atelier 9 demande de questionner la chaîne de valeurs qui soutendent l'instrumentation, ainsi que les finalités de l'instrumentation pour définir une juste proportionnalité entre les différents impacts de nos activités. Il s'agit également de favoriser la structuration de ces communautés et d'encourager la coopération et la mutualisation (matériel physique, solutions), privilégiant des solutions open-source. Il apparaît nécessaire de développer les approches du type « assurance qualité » pour maîtriser l'ensemble de la démarche, mais également de mobiliser des méthodologies autour de l'analyse de cycle de vie (ACV) pour définir l'impact direct du capteur. Le développement doit intégrer les questions de réparabilité des capteurs, qui peut s'appuyer sur du personnel dédié dans les laboratoires, ou bien des fablab le cas échéant, autour de systèmes de partage d'instruments et de pièces d'occasion. Assurer la récupérabilité des capteurs sur le terrain est également nécessaire pour limiter la dispersion de matériaux dans l'environnement. Des questions d'éthique sont posées sur la définition des flux de

données dont la gestion est soutenable et qui apportent réellement des informations qui seront utilisées.

3. Aspects transverses

Plusieurs contributions insistent sur le manque de données et d'observations sur des territoires au Sud (Afrique, Zone tropicale et intertropicale, Amérique du Sud, ...). En plus de leurs rôles dans de nombreux cycles à l'échelle globale, ces territoires sont souvent des zones critiques dans les bouleversements qu'elles subissent, soit à cause des activités anthropiques (exemple de l'intensification de l'extraction minière), soit de leur fragilité à faire face aux conséquences du changement climatique (exemple des mégaloportes côtières et de la montée des eaux). L'acquisition de données pour ces régions au Sud reste donc un enjeu pour le domaine SIC.

La question éthique de l'impact carbone des observations (multiplication des capteurs, consommation électrique, déplacements sur site), de la consommation électrique et du coût carbone des moyens de modélisation, et du stockage et de la gestion des grands jeux de données est une thématique qui apparaît finalement peu dans les contributions. Cet angle « impact environnemental » n'a pas été traité plus avant dans cet atelier, car il semble plus pertinent de l'intégrer aux réflexions de l'atelier 9.

4. Éléments éventuels pour alimenter le bilan des dernières prospectives

Une synthèse des éléments issus des précédentes prospectives est proposé sous forme du tableau suivant, qui reprend les actions envisagées. L'état d'avancement devra être discuté collectivement lors du colloque, les indications données ici n'engage que leur auteur (M PELLETIER) :

Mentionné dans le document de prospectives	Niveau d'avancement	Commentaires
Dispositifs expérimentaux : du laboratoire au terrain, en passant par les mésocosmes		
Favoriser le développement de la modélisation analogique, micro-fluidique et micro-réacteurs	Engagé	EC2CO soutien des projets émergents.
Stimuler et favoriser une plus grande structuration de la communauté autour des milieux urbains. (définir ce champ comme une des priorités d'EC2CO).	Engagé	SNO OBSERVIL
Développer un groupe de réflexion autour des conditions extrêmes en s'appuyant sur les SOERE, réseaux de mésocosmes / écotrons	Engagé ?	L'idée évoquée était le rôle des SNO et des mésocosmes pour aider sur l'étude des événements extrêmes. Et de la place des mésocosmes/ecotrons comme approche intermédiaires entre laboratoire et le terrain.
Accroître la visibilité des dispositifs expérimentaux collectifs, favoriser leur ouverture et donc leur utilisation	Engagé	Mise à jour des différentes labellisations INSU (Parc d'instruments, site instrumenté, Instruments Nationaux, codes communautaires et centres de données ...)
Capteurs : de l'in situ à l'intégration spatio-temporelle		

Création d'un groupe de travail « capteurs SIC » permettant d'avoir plus de visibilité et de faciliter les rapprochements entre communautés CNRS-INSU-SIC, CNRS-INP, CNRS-INEE et INRIAÓ	Engagé	RTCE
Évolution et renforcement des compétences au sein des SIC (ex. via DT du CNRS-INSU) dans le domaine de l'électronique embarquée, des protocoles de communication sans fils, et du développement d'applications mobiles pour faciliter les interactions entre capteurs, smartphones et les technologies de cloud computing	Engagé	Exemple Projet WISINET (protocole LoRaWAN)
Accompagner le développement de capteurs innovants dans certains domaines clés des SIC tels que la mesure in situ d'éléments chimiques et molécules en traces, de paramètres physiques et hydrologiques	Engagé	TERRA FORMA, RTCE, AO de la CS IIT, AEI
Orienter les investissements sur le continuum : R&D capteurs + application à des échantillons réels	Non abordé	
Trouver un équilibre et améliorer la continuité de financements limités simples et rapides entre la MI « AO Instrumentation aux limites » (financement de preuves de concept, validation exp. Labo)=Phase 1, et EC2CO : financement des aspects validation et applications aux milieux complexes/naturels =phase 2) ;	Engagé	AO CS IIT y répond en partie, ainsi que EC2CO et ses projets à risque (?)
Capter des financements R&D privé-publics basés sur l'innovation en sciences de l'environnement (Industriels, Startups) FUI, UE H2020	Peu abordé	Travail des aspects valorisation au niveau INSU.
Besoins et challenges analytiques : analyses isotopiques et approches moléculaires		
Ne pas rater la transition vers le « big data », le stockage, le traitement, l'analyse des larges jeux de données	Engagé	Structuration nationale qui a avancé, information et sensibilisation des personnels mais avec marge de progression évidente.
Accroître les compétences collectives de notre communauté concernant les modes de traitement des données : outils de la chimométrie (transfert d'échelle, représentativité)	Engagé (?)	
favoriser l'accès aux grands équipements : sensibilisation, connaissance des outils, des procédures, aide au montage des propositions...	Engagé	Reste certainement un point d'attention, même si des lignes sont plus « ouvertes » aux SIC comme Fame UHD par exemple.
Accompagner la fin des financements de type PIA (EQUIPEX, etc.), accroître la visibilité et la mutualisation des outils (assurer le succès du projet d'IR REGEF). Intégrer, accompagner les initiatives locales (IDEX, Feder, CPER) au niveau	Engagé	Création des PEPR, et maintenant des agences de programmes. REGEF est créé.

national via les OSU		
accroître les moyens en imagerie hyperspectrale, 3D de la matière molle, en favorisant un rapprochement avec la biologie/médecine	Engagé	Il existe effectivement des plateformes de microscopie confocales dédié aux objets environnementaux (exemple DIESE au LIEC), inventaire à faire au niveau national
Autres points sur les autres thèmes des prospectives SIC 2018 - 2022		
L'échelle du territoire : pour une meilleure aide à la compréhension et à la décision		Reste un sujet peut-être encore plus évoqué dans les contributions 2023
Pour le suivi des aléas naturels, besoin de longues série temporelle, avec des résolutions spatiale et in-situ		Axe de travail qui apparaît encore dans les contributions 2023
Développement d'une observation paléoenvironnementale		Idée qui est également toujours d'actualité, mais qui a dépassé le stade du développement. En 2019, le rapport de conjoncture de la section 30 indiquait que 8% des effectifs de chercheurs travaillaient sur la thématique paléoécologie et paléoenvironnements quaternaires.
Apport des données spatiales à l'approche intégrée ou intégrative des écosystèmes		Était déjà évoqué le potentiel usage des données spatiales, et leurs améliorations. Quelle est aujourd'hui l'importance de l'utilisation en routine des données spatiales en SIC?
Les modélisations étaient trop compartimentées et trop simplistes, et lien avec meilleure connaissance des processus.		Il semble que la communauté se soit emparée de ces problématiques, qui restent à poursuivre.
Les problèmes de ressources humaines pour la calibration/validation des observations spatiales sur le terrain était déjà clairement notés		Solution des capteurs low cost indiquée.
Utilisation des données générées par approches de modélisation directe ou inverse permettrait d'optimiser les protocoles d'observation et leur fréquence		Pas vu dans les contributions 2023
La communauté SIC n'a sans doute pas suffisamment recours aux plateformes de modélisation		Y a t il eu une amélioration sur ce point ?
On parlait déjà de couplage de modèles déterministes, avec aussi l'intégration de la dimension sociale, prise en compte explicite de la dynamique des interactions entre les hommes et leur milieu.		
Manque de profondeur temporelle des données à haute résolution spatiales	Engagé	Amélioration des données spatiales avec des passages plus fréquents et des résolutions spatiales améliorées
Mesures haute fréquences de paramètres abiotiques (hydrologie, physico-chimie, température ...)		
Relations environnement santé (prospectives SIC 2018-2023)? Étude des pathogènes dans l'environnement (section 30 2019)		Finalement peu de choses dans les contributions sur ces sujets.

Mise en place d'une démarche qualité dans les systèmes d'observation notamment la métrologie, la traçabilité et la bancarisation des données	Peu abordé	Le terme qualité est quasiment absent dans les contribution. Le réseau des qualitiens INSU (intégré à MAPI) est surtout présent dans le domaine AA.
Questionnement sur l'implication des personnels ISC dans la définition des missions spatiales		Les missions évoquées en projet en 2018 ont été lancées et fonctionnent (CYGNSS, SWOT par exemple, BIOMASS ?)
Pour une complémentarité SNO-pôle de données	Engagé en partie	Dépend beaucoup des ressources des SNO et/ou des unités et OSU de rattachement. Reste encore un point dur pour certains SNO, même si des progrès sont à constater dans beaucoup de SNO.
Les interactions entre processus biotiques/abiotiques étaient peu prises en compte dans les modèles.		Cette question reste très présente dans les contributions de 2023.
Améliorer la grande hétérogénéité spatiale de la zone critique, ainsi que sa grande variabilité temporelle (zone très réactive). Donc impose des grands jeux de données et de descriptions des milieux pour définir des conditions initiales et contraindre les trajectoires des modèles de la zone critique.		
Thématique de l'assimilation de grands jeux de données.		Peu revu ici
Toujours le problème de changement d'échelle (15 ordres de grandeur entre le moléculaire et l'océanographique/climatique) de même pour les échelles de temps.		Verrou identifié à l'échelle du mm cm.
La modélisation moléculaire pour acquérir des connaissances sur les mécanismes élémentaire, l'intégration du transport réactif dans une nappe par exemple, ou l'échelle mésoscopique (microorganisme, colloïdes, physico-chimie des (bio)interface	Engagé	Verrou d'une meilleure appréhension des processus (bio) physique, reste à poursuivre car trop de modèles avec des approches thermodynamiques réductrices
Promotion du dialogue entre modélisateurs/expérimentateurs/preneurs de décisions, informaticien/ingénieur système et modélisateur		
Maintien des compétences et politique de recrutement ambitieuse d'ingénieurs	Pas engagé	Manque RH qui reste important
Formation ciblée vers les biologistes, écotoxicologues	?	La demande d'intégration des données biologiques affichées dans plusieurs contributions semble indiquer que cela n'a peut-être pas été réalisé.
Recensement et la mise en commun des modèles développés par la communauté via des portails unifiés. Rôle de THÉIA		Je ne suis pas en mesure d'évaluer si une démarche a été faite dans ce sens.
Menace de ne pas avoir les ressources humaines pour traiter et gérer les données produites par les observatoires		Reste un sujet majeur
Difficulté d'instrumenter les événements		Toujours d'actualité

extrêmes.		
Demande d'outils et de développement pour les paléo-environnements, -altitudes, -précipitations, problèmes des proxys utilisés. Développement de nouveaux traceurs géochimiques insuffisants		
Retard constaté dans le domaine de la cartographie LIDAR, Hyperspectrale, topographie 3D haute résolution	Engagé	Beaucoup de laboratoire dispose de drone par exemple, expertise de certains SNO (DYNALIT), ou de certains unité dans le domaine. Réflexion en cours GT INSU
Décloisonner temps longs/temps courts TS/SIC		
Données topographiques haute résolution		Pas capable d'évaluer si cela a progressé.
Modélisation de la ZC aux mésoéchelle : besoin en RH		

Prospective SIC 2023

Document de synthèse préliminaire des ateliers

Titre de l'atelier	Observons nos Observatoires
Nom(s), prénom(s), Adresse(s) mail des coordinateur.trice.s	Sandrine Anquetin – Philippe Choler
Membres du groupe d'animation de l'atelier	Isabelle Braud ; Christophe Delacourt ; Jérôme Gaillardet ; Dominique Joly ; Jean-Michel Martinez ; Christophe Piscart ; Anaëlle Simonneau, Annaïg Le Guen
Date/version du document	

1/ Mode de fonctionnement de l'atelier

Cet atelier a bénéficié de quatre documents fondateurs, consignant des réflexions récentes et collectives sur l'observation dans le domaine SIC. Déposés sur le site de partage de la prospective SIC-2023, il s'agit i) du document de *prospective des Services Nationaux d'Observation INSU-SIC (2021-2026)* réalisé par la CS-SIC en 2023 ; ii) du *Livre blanc à destination des tutelles des IR OZCAR et RZA : Le futur des observatoires de recherche français et leur contribution à l'IR européenne eLTER*, produit début 2023 par un collectif OZCAR-RZA; iii) du texte *OZCAR 2.0. : une vision pour le futur de l'IR OZCAR*, co-écrit en 2022 par un collectif large de la communauté OZCAR mais également de personnes extérieures, et enfin iv) de l'*OZCarbre* réalisé par OZCAR en 2022. A ces documents ont été ajoutées les propositions de la communauté via les fiches déposées sur le site (38 fiches sur 93 ont indiqué leur lien avec l'observation).

Le groupe de travail s'est réuni en visioconférence 4 fois, a participé autant que possible aux réunions hebdomadaires inter-ateliers. Ces premières réflexions ainsi que les ambitions du colloque ont été présentées en décembre lors du ComEx OZCAR ; elles seront partagées en janvier 2024 lors du ComEx ILICO.

2/ Contribution scientifique

Observer sur le long terme. Pourquoi ?

Les arguments en faveur de l'observation long terme de la zone critique et des socio-écosystèmes restent identiques à ceux mentionnés dans le document des prospectives SIC de 2018. **Ce qui nous semble mériter de nouveaux échanges et réflexions collectives est le contexte**, qu'il soit **scientifique** ou **organisationnel, national** ou **européen**, dans lequel doit se déployer ou se renforcer cette stratégie d'observation long terme. Ceci est d'autant plus nécessaire que le paysage français des outils d'observations est complexe (IR, OSU, ZA, OHM, SNO...) ce qui nous rend peu lisibles aux niveaux international et national, notamment pour les interlocuteurs de la société civile et les utilisateurs non-académiques.

Nous proposons donc **d'imaginer ensemble les contours de l'observatoire du futur** ou, dit autrement, de **l'observatoire en mesure de relever les principaux défis** que nous avons déjà identifiés, à savoir (i) documenter et rendre intelligibles des trajectoires spatio-temporelles complexes des systèmes ; (ii) contribuer à la reconnexion des disciplines scientifiques qui ont pour objet d'étude la zone habitable de notre terre et réinventer nos représentations de cette zone habitable ; (iii) fluidifier les échanges entre thématiciens et spécialistes du développement des capteurs, entre observations, données et modèles ; (iv) faire émerger une science des lieux, soucieuse de répondre aux enjeux de la gestion durable des territoires (utilisation des ressources, atténuation des risques) et associant tous les acteurs du tiers secteur de la recherche (v) participer à la formation initiale et continue ; (vi) co-construire un espace européen de l'observation de la zone critique et des socio-écosystèmes. Nos observatoires actuels sont-ils en mesure de répondre à ces défis ? Que leur manque-t-il pour y parvenir ?

Les pistes de réflexion

a) Les observables dans le domaine SIC – Forces & faiblesses

Nos observatoires accueillent une recherche de rang mondial adossée à la mesure des variables et processus clés des hydro-géo-socio-éco-systèmes. Ils sont engagés dans le développement de méthodes innovantes en

météorologie de l'environnement. Avec les projets CRITEX et TERRA FORMA, ils bénéficient, ou vont bénéficier, du déploiement d'une nouvelle génération de capteurs et de réseaux de capteurs. L'attention croissante portée au cycle de la donnée (production/qualité/bancarisation) est aussi un élément marquant et les nombreux progrès réalisés ces dernières années (e.g. SI THEIA/OZCAR) préparent nos observatoires à l'intégration européenne et fluidifient les allers et retours entre observation et modélisation. Enfin, les complémentarités entre les outils et infrastructures nationales (notamment OZCAR, RZA, ILICO) nous placent dans une situation favorable pour une observation plus intégrée de la zone habitable, dépassant les carcans disciplinaires. En ce sens, les SNOs sont notamment administrés par des OSU (et/ou des UMR) qui sont par définitions multi-thématiques et tournés vers le continuum observation/recherche/formation.

Ces forces sont contrebalancées par plusieurs points de faiblesse identifiés dans les contributions écrites et relevant de quatre ordres : (i) l'identification d'un **ensemble de compartiments et de variables** qui sont peu ou mal intégrés dans les dispositifs actuels quand bien même les enjeux liés à leur observation sont majeurs notamment pour engager des approches systémiques, cela concerne le sol et ses usages, le sous-sol, la biosphère, les milieux très anthropisés, les grands systèmes fluviaux de France métropolitaine notamment, et les estuaires ; (ii) **l'insuffisante co-localisation** des observables SIC (e.g. parcelles RENECOFOR, sites ILICO et RZA, ou des sites de mesures d'écologie, rarement co-localisés avec les sites de mesures de l'IR OZCAR ; eux-mêmes rarement ou non co-localisés avec ceux d'autres IRs (RZA, ACTRIS, ICOS, UMI) ou issus de réseaux de surveillance des acteurs opérationnels (Banque Hydro, ONF, Agences de l'Eau) ; (iii) **l'agilité modérée des observatoires à répondre à des besoins ou défis émergents**, voire à reconfigurer leur mode opératoire dans un contexte de crise environnementale aiguë (lien avec atelier#9) ; (iv) **l'insuffisante intégration des questionnements sur l'étude des socio-écosystèmes** dans leur complexité pluri- et interdisciplinaire pour mieux aborder les enjeux et répondre aux besoins sociétaux.

Question : *Comment renforcer le caractère intégré et l'agilité de nos observatoires dans tout le continuum SIC tout en préservant les suivis de long terme et en garantissant leur réactivité face aux observables en devenir ?*

b) Nos observatoires face aux enjeux environnementaux planétaires

L'élévation du niveau de la mer, les tempêtes plus fréquentes en lien avec l'érosion littorale, les bloom de phytoplancton, les événements d'anoxie ou d'hypoxie menacent les interfaces Terre-Mer, mettant en danger les écosystèmes, les infrastructures et les habitants dans un contexte d'urbanisation massive. L'observation de long terme permet de détecter les phénomènes rares et d'en décrire l'historique des occurrences (accélération en lien avec les changements globaux) et les conséquences.

Sans altérer la qualité des recherches effectuées, les masses critiques des agents permanents des institutions de recherche sont réduites dans les Suds et dans les outre-mers français qui sont pourtant les sentinelles de l'environnement, dans le sens où ces territoires vulnérables qui abritent une grande biodiversité sont les premiers impactés par les conséquences des changements globaux et les événements extrêmes. La modification de socio-écosystèmes peuvent par ailleurs avoir des impacts régionaux voir mondiaux (e.g. déforestation en Amazonie). De plus, pour mieux comprendre les phénomènes et adapter les modèles globaux, il manque l'intégration d'échantillonnages temporels et d'échelles spatiales dans les zones où il y a peu de déploiement de dispositifs mais où l'impact du changement global est fort. L'Observation de long terme doit s'adapter pour être réalisée par les ressources locales (humaines et matérielles). Cette stratégie d'observation nécessite d'être optimisée et pérennisée aux différentes étapes du cycle de la donnée en alliant frugalité et efficacité et en développant cadres, outils et plateformes innovants de manière adaptative.

Question : *Quels seront les nouveaux outils et les nouvelles approches dans les futurs Observatoires dans les contextes de masse critique faible sur des territoires à enjeux majeurs ?*

c) Observer autrement (liens avec ateliers #2, #5, #9)

Les questions de compréhension et de simulation de l'évolution de la zone critique et des écosystèmes que nous souhaitons aborder nécessitent la mise en œuvre d'approches systémiques (« *whole system approach* ») permettant l'intégration observations/modèles développés par différentes disciplines sur quelques sites, intégration encore trop peu réalisée dans les observatoires. Cette intégration doit par ailleurs prendre en compte toutes les échelles temporelles, y compris les temps longs (temps géologiques). De plus, les observatoires en place ne permettent de documenter que de toutes petites parties des territoires, alors que les scientifiques sont de plus en plus sollicités pour répondre à des questions de la société sur l'habitabilité des territoires et la manière de les transformer pour aller vers des sociétés plus durables et résilientes. Le livre blanc « Le futur des observatoires de recherche français et leur contribution à l'IR européenne eLTER » indique que « *L'observatoire du futur est un observatoire inventant une « science des lieux » et impliquant les acteurs* ». L'implication de la

société civile et la co-construction des recherches avec les acteurs des territoires sont ainsi mis en avant et déployés dans des territoires (living labs, territoires apprenants), nous obligeant à repenser la place du scientifique et la manière dont les dispositifs d'observations sont mis en œuvre et à réfléchir comment les instruments déployés et les données produites peuvent être appropriés par les citoyens.

En zone côtière (spécialement dans les estuaires/deltas), la spatialisation des mesures d'observation continue est cruciale, ces zones étant situées dans de forts gradients écologiques et biogéochimiques : des pistes de réflexion sont en cours d'expérimentation (utilisation d'engins mobiles-gliders, AUV, image satellites, mouillages à bas-cout-Mastodon, ...) pour tenter de mesurer et comprendre les variations spatio-temporelles dans ces zones d'interface terre-mer.

Par ailleurs, à l'heure de la généralisation des mesures à haute fréquence, du développement de techniques d'analyse et d'imagerie toujours plus performantes et du besoin d'observations spatialisées à haute résolution, se pose la question de l'impact environnemental de l'observation et de l'utilité de tous ces capteurs et instruments. Plusieurs projets visent à développer des capteurs frugaux à bas coût (e.g. Equipex+ TERRA FORMA), à déployer des sciences participatives et à accompagner la transformation des territoires (WP4 « du capteur à l'action » de TERRA FORMA, PEPR TRANSFORM). Un groupe de travail du GDR Labo1.5 réfléchit à la quantification du coût carbone des IRs en environnement. Si ces initiatives vont dans le bon sens, elles nécessitent un réel changement dans les pratiques de la recherche, la manière dont ce type de projet et les scientifiques qui les conduisent sont évalués, la manière de considérer les savoirs profanes, la manière de mettre en œuvre le dialogue science – société.

Questions : *Quelles évolutions en termes de formation, d'évaluation de la recherche, de dialogue science-société devons-nous proposer pour faire émerger cette nouvelle façon de faire de la recherche ? Comment intégrer les aspects d'impact environnementaux et d'éthique de la recherche dans la réflexion ?*

d) Les observatoires dans le domaine SIC – Éléments de prospective organisationnelle

- **Liens avec les Instruments et équipements nationaux et les programmes d'observation de la terre**
(liens avec atelier #2)

Les grands instruments et plateformes issus de la physique (Synchrotron, ASTER, REGEF, etc..) proposent des moyens analytiques qui ont de nombreuses applications en bio-géosciences (e.g. méthodes de spectroscopies pour l'étude des mécanismes réactionnels clés des cycles biogéochimiques ou de la mesure des rapports isotopiques par spectrométrie de masse utilisés comme traceurs environnementaux). Il est nécessaire de mieux faire connaître l'intérêt de ces méthodes comme complément des observations réalisées *in situ*, mais aussi d'envisager les conditions d'un accès facilité à ces moyens analytiques pour nos observatoires.

On retrouve ce même enjeu dans les liens entre les observatoires et les plateformes analytiques « mobiles », constitués ou non en parcs instrumentés nationaux, et ayant vocation à réaliser des campagnes de mesure ponctuelles ou sur des pas de temps réduits (e.g. RiverLab (IR OZCAR), parc national d'équipements pour la géophysique ; analyse des sols, phénotypage des plantes (IR AnaEE) ; la génomique (IR ILICO)). Ces services sont bien souvent méconnus, et il faut encourager leur sollicitation par les observatoires qui sont en dehors des IR dans lesquels ils ont été conçus. Au-delà d'une caractérisation plus complète des territoires instrumentés, il convient aussi de souligner que ces mesures renforcent ou font naître les interactions entre disciplines.

Enfin, les contributions mettent en avant les besoins en imagerie haute résolution (spatiale, temporelle et spectrale) en citant les données LiDAR, les acquisitions par drone ou les données aéroportées et satellites pour le suivi des états de surface (étendue du couvert neigeux, activité de la végétation, formes géomorphologiques etc). Les interrogations portent ici sur l'organisation des chaînes d'acquisition et de traitement de la donnée, sur les modalités de l'archivage et de la mise à disposition des produits dérivés, et parfois même le modèle économique. Dans ce registre, RI eLTER a par exemple développé des routines facilitant l'accès aux produits Copernicus pour ses sites et plateformes. D'autres initiatives de ce type pourraient concerner des produits à très haute résolution spatiale de l'IGN (fond blanc, Lidar etc) à travers un accord-cadre. L'IR ILICO a intégré le code communautaire SIROCCO pour proposer des outils numériques et des produits répondant aux problématiques des espaces côtiers. L'utilisation de l'IA et du machine learning peut jouer un rôle dans l'analyse et l'exploitation des données d'observation.

Question : *Comment faire en sorte que nos observatoires bénéficient mieux et davantage des services fournis par les grands instruments, les parcs instrumentaux mobiles et les programmes d'observation de la terre ?*

- **Travailler en inter-IR et en meilleure synergies avec les réseaux opérationnels.**

Les dispositifs d'observation français souffrent d'un manque de co-localisation entre infrastructures (OZCAR, RZA, ICOS, ILICO, AnaEE, EPOS, etc.), ce qui nuit à la mise en œuvre d'approches systémiques dans le domaine des SICs nécessaires pour aborder les questions d'évolution de la zone critique et d'habitabilité des territoires. Cela se traduit également par un manque de clarté sur les rôles respectifs des OSU et des UMR pour répondre aux besoins des SNOs, et entre les OSU et les IR pour l'appui d'une demande de moyen (RH, financiers). La dichotomie INSU-INEE a été relevée comme une illustration du manque de stratégie dans leur politique emploi et de visibilité à long terme pour assurer les missions actuelles et à venir.

Par ailleurs, les dispositifs d'observation opérationnels pilotés par certains services de l'état (MTES, Agences de l'Eau, OFB, ONF, parcs naturels ou régionaux...) collectent des données, trop souvent ignorées du monde académique et réciproquement. Notons que les données d'observations pourraient être de réels points de convergence entre les dynamiques académiques et opérationnelles.

Enfin, les données collectées par toutes ces sources ne sont pas toujours faciles à trouver et souffrent d'une hétérogénéité dans les modèles de données utilisés pour les documenter et d'interopérabilité entre systèmes. Une meilleure synergie entre tous ces dispositifs et sources d'informations serait de nature à renforcer le nombre et la nature des observables sur les sites d'observations SICs afin d'aller vers plus d'interdisciplinarité et de pouvoir mettre en œuvre des approches systémiques, tout en faisant un meilleur usage des ressources publiques tout en limitant leur empreinte environnementale grâce à une meilleure mutualisation des moyens.

Notons néanmoins que la « FAIRisation » des données a naturellement rapproché les infrastructures d'observation de l'IR DATA TERRA, mettant ainsi en lien les données in-situ avec les modèles climatiques des scénarios d'évolution pluriannuels dans le domaine SIC.

Question : *Quelles structures de concertation/coordination/gouvernance faudrait-il mettre en place pour aller vers plus de co-localisation entre les dispositifs français des IRs et avoir une meilleure synergie entre dispositifs de recherche et dispositifs de monitoring opérationnels ?*

- Les PPR / PEPR, nouvel acteur dans le paysage de l'observation

La montée en puissance de projets nationaux structurants (type PIA4) dédiés à un objet (le sol, le sous-sol, l'eau, les solutions fondées sur la nature, le carbone) ne s'appuient pas suffisamment sur les outils et infrastructures existants. Il serait particulièrement fâcheux que des réseaux parallèles de sites se déploient dans le cadre de ces PEPR, avant qu'un examen attentif des possibilités offertes par les observatoires actuels ne soit conduite. Quelques projets ciblés (e.g. Carbonium du PEPR FairCarboN, PPR-RiOMar) mentionnent néanmoins explicitement un soutien aux observatoires (instrumentation, ressources humaines), ce qui va dans le bon sens. Par exemple, la partie côtière du PPR Océan et Climat s'est montée en lien étroit avec ILICO et s'articule maintenant autour de cette IR.

Question : *Comment faire en sorte que les PPR/PEPR participent à la stratégie d'observation long terme ? Quelles structures de gouvernance pour assurer la cohérence entre les grands projets et les observations long-terme ?*

- Liens avec les territoires / acteurs-décideurs locaux et société (lien avec atelier #5)

Le fonctionnement cloisonné de nos organismes de recherche freine l'interdisciplinarité et la transdisciplinarité, menée en synergie étroite avec les acteurs des territoires. Pour répondre aux enjeux sociétaux posés par les interactions climat – vivant – terre et usage des terres - société, il est nécessaire de « sortir des silos disciplinaires pour aller vers des réponses systémiques » et donc de faire évoluer notre stratégie d'observation. Il s'agit, par exemple, d'impliquer les parties prenantes des territoires pour permettre des découvertes plus transformantes et de faciliter leurs diffusions et valorisations (e.g. changement de pratique) dans la société. Sans faire plus, il est nécessaire de faire mieux, en encourageant la mutualisation de gestion des données et des échantillons acquis en dehors du domaine académique et en se rapprochant des réseaux opérationnels avec lesquels une co-localisation des observations pourrait ouvrir à des économies de ressource publique.

Question : *Comment impliquer la société civile et quelles actions à mener pour atteindre ces objectifs, en partie, déjà mentionnés lors de la prospective SIC 2017 et encore d'actualité ?*

- Liens avec la modélisation (lien avec l'atelier #2)

De plus en plus, les sciences de l'environnement se dirigent vers des jumeaux numériques, combinant modèles et données. De ce point de vue, la partie interface océanique est en avance de phase sur le continental. Ces jumeaux numériques réclament des données standardisées et utilisable directement par les modèles. Dans ce contexte, l'utilisation de l'IA et des réseaux de neurones pourrait être une vraie innovation des prochaines années. Par ailleurs, les modèles doivent être optimisés pour représenter tous les compartiments des écosystèmes afin de pouvoir produire des simulations du futur proche et lointain dans le cadre des attentes

sociétales (gestion environnement, carbone, ressources, ...). Un travail-pilote de cet ordre est en cours dans le PPR-RiOMar (Océan et Climat).

- Le chemin vers l'Europe

La feuille de route des infrastructures européennes impacte fortement l'organisation des observatoires en Europe, créant des réseaux parallèles complémentaires pour certains ou redondants pour d'autres. Cet ensemble hétérogène d'instrument est ainsi constitué de réseaux d'observatoires hautement instrumentés dans l'observation de la zone critique motivée par l'établissement de bilans de matière et d'énergie et la compréhension des processus et la modélisation numérique et d'autres plus généralistes comme eLTER-RI qui ambitionne le monitoring de toute les composantes de l'environnement, y compris la composante sociétale, par une approche dite « *Whole System Approach for in-situ research on Life Supporting Systems in the anthropocene* ». Cette restructuration européenne représentative de la diversité des socio-écosystèmes à l'échelle de l'Europe est fondamentale afin d'optimiser les collaborations, favoriser les synergies et les complémentarités et ainsi, éviter les doublons, travailler en commun sur les indicateurs et les services qui y sont produits, sur les données tout au long de leur cycle de vie dans le cadre d'une gestion FAIR. Ces infrastructures européennes doivent permettre le dialogue et une meilleure coordination entre les différents états et institutions (organismes nationaux et universités), un partage des ressources et d'objectifs partagés, décloisonner les disciplines en mobilisant les réseaux thématiques afin de mettre en place des approches systémiques et le dialogue avec la société.

Si l'intégration vers l'Europe reste une force soulignée par plusieurs contributions, la complexité du paysage institutionnel s'avère être également largement perçue comme une faiblesse lorsqu'aucune instance de haut niveau rassemblant les Universités et Organismes Nationaux de Recherche impliqués dans les observations SIC n'est constituée pour définir des orientations stratégiques claires et partagées.

Les contributions soulignent un manque de politique incitative forte visant à encourager l'engagement des responsables de SNO ainsi que le corps du CNAP dans cette construction européenne. Ce manque de dialogue et de coordination (voire cloisonnement) entre les différentes tutelles/organismes peut, si poussé à l'extrême (en silo), freiner l'interdisciplinarité, conduire à une dispersion des ressources, un manque d'objectifs nationaux partagés, et accentuer par le fossé entre les mondes académiques et opérationnels pourtant tous deux tournés vers l'acquisition d'observables et la recherche de réponses systémiques.

Question : *Comment renforcer les synergies entre les IR nationales et européennes en évitant la compétition et l'empilement des couches complexe et épuisantes pour notre communauté scientifique ?*

3/ Aspects transverses :

Formation : renforcement des compétences par la formation de techniciens pour l'acquisition et la mise en place de cadres pour l'exploitation des données ; SNO support pour le « *learning by doing* » ; environ 50% des universités françaises contribuent aux missions d'observation (Enseignant-chercheur ; BIATS)

Besoins RH : Gestion et diffusion des données produites ; Soutien à l'acquisition et la production de données ; Gestion et Administration des SNO ; CNAP et reconnaissance des heures des enseignant.es.chercheur.ses ; ITA BAP A et B

Vers des carrières professionnelles épanouies : reconnaissance des missions d'observations pour toutes les catégories de personnels ; sur la base du volontariat, accompagner les mobilités inter SNOs

4/ Éléments éventuels pour alimenter le bilan des dernières prospectives :

1) État des lieux au regard des éléments de prospectives SIC-2017

Mentionné dans le document de prospectives		Commentaires
Observations long terme		
Nécessité de labelliser l'observation du permafrost et de la couverture neigeuse.	OK neige Réflexion permafrost	Nouveaux contours SNO GLACIOCLIM
Renforcer la politique d'observation des milieux urbains et péri-urbains	OK	Labellisation SNO Observil 2020 Il reste beaucoup à faire sur la notion d'occupation des littoraux, zones d'enjeux majeurs, de biseau eau salée...
Intégrer le régolithe dans les systèmes d'observation.	Engagé	PEPR Sous-sol Bien commun. Il y a aussi quelques Standard Observations sur la géosphère dans eLTER
Mettre en place des systèmes d'observation pour étudier la relation étroite entre l'environnement et la santé humaine (concept « <i>one health</i> »)	Engagé	Labellisation en cours ZA Camargues
Besoin de mise en place de dispositifs de maîtrise de la qualité des mesures acquises au sein des systèmes d'observation, la métrologie, la traçabilité et la bancarisation des données.	Engagé	Avec les Observations Standards eLTER, il y aura des protocoles associés et donc un certain niveau de qualité associé Action identifiée dans ILICO pour l'expérimentation d'un logiciel de gestion du MCO.
Coordonner la démarche qualité à l'échelle nationale (rédaction des protocoles, métrologie, calibration des sondes)	Engagé	Il y aura des choses issues de eLTER et d'ILICO sur les protocoles, qui peuvent permettre d'enclencher une démarche vertueuse dans l'ensemble des observatoires
Besoin de développer une communauté structurée et visible à l'international autour de l'approche intégrée.	Engagé	Labellisation eLTER pour OZCAR et RZA Visibilité internationale via les relations avec les réseaux CZO aux USA et TERENO en Allemagne qui développent aussi une approche zone critique Il y a la construction de JERICO avec l'IR ILICO
Identifier les collections déjà existantes (sols INRA, ECOFOR ONF...), recenser et référencer les collections potentielles ou en cours et d'organiser, au niveau national, les lieux et conditions de stockage.	Engagé	PEPR OneWater ? Du travail effectué au niveau des interfaces littoraux et côtiers, notamment avec les Données Complémentaires d'Intérêt Collectif
Besoin d'interopérabilité des données.	OK	THEIA et pôles thématiques, IR Data Terra et Equipex+ Gaia Data
Intégrer les données satellitaires et les produits dans les SNO existants.	Engagé	Ça existe déjà dans certains SNO (OSR-SW, HYBAM, Observil) Retard à l'échelle du littoral et du côtier

Renforcer des politiques concertées entre les universités et le CNRS (via les OSU)	Engagé	Opérationnel Montpellier, Grenoble, reconnaissance des heures des EC
Poursuivre les démarches de labellisation IR	OK	Tous les SNO sont dans des IR
Maintenir les dispositifs de financement récurrents des SNO	OK	
Associer les SNO à des réseaux internationaux.	Engagé	C'est en cours au travers des IR européennes existantes ou en construction (eLTER, ICOS, AnaEE, In-Silva, JERICO...)
Favoriser les synergies entre SNO et Theia et le domaine spatial, via des programmes de type PNTS	Engagé	En cours dans le cadre de la réorganisation des Centres d'Expertise Scientifiques (CES) de Theia et l'identification des liens entre SNO et CES Remettre les ambitions face aux enjeux : le TOSCA est une force de financement très importante.
Approches intégrées = Observation (in-situ & télédétection) <-> Modélisation		
Besoin d'un lieu d'échanges pour favoriser l'approche intégrée (observation <-> modélisation)	OK	Présent dans l'IR OZCAR (WP2) mais il faudrait pouvoir avoir plus de relations avec les modélisateurs du climat Code communautaire CC CROCO dans l'IR ILICO
Créer une plateforme inter-instituts et inter-institutions autour des méthodologies, modèles et données mobilisées pour l'approche intégrée	Non abordé ?	important de s'inscrire dans les infrastructures existantes qui sont déjà inter-instituts et inter-organismes ; réfléchir à leur évolution
Impliquer plus les jeunes chercheurs, les IT impliqués dans les SNO pour favoriser l'ouverture vers les maths, informatique, SHS, SI etc...	Engagé	Pour les maths : le PEPR Mathvives et notamment l'implication du SNO Dynalit Pour les SHS, voir l'émergence du PEPR Solu-Biod
A propos de THEIA, besoin de passer de produits pré-opérationnels à des produits à destinataires d'utilisateurs finaux peu expérimentés	OK	engagé dans le SNO Observil et OK SNO HYBAM
A propos de l'IR Système Terre (maintenant DATA TERRA), développer des portails coordonnés intégrant des services innovants de découverte, d'analyse et de traitements et de diffusion des données (sol, mer, avion, espace)	OK	Gaia Data est un équipex+ qui fournit des moyens pour développer les services sur les données (implique Climeri_DataTerra-PNDB) ; il ne remplace pas Data Terra Beaucoup de projets et moyens ont été mobilisés sur cet objectif (Equipex+, plusieurs projets européens, projet ciblé OneWater Data)
Faire évoluer les observatoires (mesures spatialisées mobiles/ponctuelles dans le temps vs observations long terme, nappe de capteurs <i>in situ</i> faible coût, acquisition de données massives spatialement et temporellement)	Engagé légèrement	Quelques évolutions (ex Marmor, TERRA FORMA) ; plusieurs initiatives territoriales sont déjà en place (notamment dans les ZA) pour une approche intégrée sur des sites spécifiques
Exploiter les autres portails de données (ex. données concernant la biodiversité) et de développer les partenariats inter-instituts (partages	Non abordé ? engagé en fait	Des avancées effectuées à l'appui du rapprochement avec DATA TERRA ; PNDB devient le 5ème pôle de Data Terra depuis le 1er

de données), parfois avec le privé, pour accéder à de nouveaux jeux de données mieux adaptés aux approches intégrées.		janvier 2024
L'interdisciplinarité, voire la transdisciplinarité, devra être au cœur des préoccupations de l'approche intégrée.	Engagé	PEPR Transform ?, WP4 TERRA FORMA
Mieux prendre en compte l'Homme et ses interactions avec la zone critique	Non abordé	
Collaborer avec les SHS mais aussi avec les informaticiens et les mathématiciens pour tester de nouvelles formulations ou des outils de traitements de données de masses innovants (data mining, cloud computing, Intelligence Artificielle...)	Peu abordé	
Développer les assimilations multi-variables ou multi-capteurs coïncidentes (ex. optique et radar en télédétection) pour améliorer la description du système ainsi que la compréhension des processus physiques.	Engagé	Des travaux engagés sur la meilleure intégration de données géophysiques dans les modèles hydrologiques (ITES)
Développer/encourager les sciences participatives pour la génération de données permettant d'impliquer les citoyens.	Engagé	WP4 de TERRA FORMA « du capteur à l'action ». Un thème transverse sur ce sujet dans l'IR OZCAR
Promouvoir des initiatives comme l'Institut de convergence DigitAG ou les approches Living Lab développées dans le cadre de l'Observatoire Spatial Régional ou du TIGA Dijon	Engagé	Mise en place de Living labs dans le PEPR Solu-Biod

2) Quelques éléments de bilan

- Des dispositifs d'observations permettent une **recherche de rang mondial**
- **L'instrumentation innovantes en métrologie de l'environnement comme carrefour des disciplines** - Une représentation quasi-exhaustive des moyens d'Observation du plus conventionnel vers les nouvelles technologies (CRITEX ; TERRA FORMA)
- **Modélisation multi-sites comme outil de dialogue** entre les sites et A/R avec les observations. Besoin néanmoins d'une meilleure connexion de la **communauté de modélisateurs du transport-réactif** aux observation long terme
- **FAIRisation de la communauté bien engagée** (SI THEIA/OZCAR) ; les connexions fortes avec Data-Terra permettant une stratégie claire et harmonisée de mise à disposition des données
- **Les observatoires sont un creuset pour l'interdisciplinarité**
 - o Complémentarité OZCAR et RZA pour aller vers des réseaux d'observations multi, inter et transdisciplinaires
 - o Diversité des hydro-géo-socio-éco-systèmes observés cohérente avec les grands enjeux d'une gestion durable des territoires en lien avec les parties prenantes (ILICO)
 - o Tremplin vers des BDD ouvertes, le recueil d'informations participatives pour une réelle utilité des structures à l'action publique via des modes de recherche collaboratifs (e.g. Living Lab associant acteurs académiques/économiques/politiques)
- Les SNO s'appuient sur les rôles complémentaires des OSU et des UMR/UAR
- Des IR qui se sont **engagées dans la trajectoire européenne** (JERICO, eLTER)

Prospective SIC 2023

Document de synthèse préliminaire des ateliers

Titre de l'atelier	Interfaces et continums dans les SIC
Nom(s), prénom(s), Adresse(s) mail des coordinateur.trice.s	Jean-Louis Rajot, Jean Riotte, Dirk Schmeller, Yoann Copard
Membres du groupe d'animation de l'atelier	Béatrice Marticorena, Claire Delon, Caroline Pierre, Nicolas Savoye, Patricia Bonin, Laetitia Minguez, Olivier Bour, Damien Raclot
Date/version du document	30/01/2024

Mode de fonctionnement de l'atelier

Le groupe d'animation de l'atelier a pu synthétiser les contributions reçues à l'automne 2023 à partir de réunions hebdomadaires. Ci-dessous est présenté le document préliminaire qui ne peut évoquer l'ensemble des contributions reçues. Elles seront reprises au mieux dans le document final des prospectives SIC. Cette synthèse préliminaire des contributions a été soumise, via le site web, à la communauté courant décembre pour d'éventuelle réaction par post-it jusqu'à fin janvier.

Introduction - Définition

Les interfaces dans les SIC, définies comme des surfaces d'échanges d'eau, de matière et d'énergie entre des compartiments abiotiques (solide-liquide-gazeux) et/ou biotiques à différentes échelles spatiales (moléculaires à continentales) et temporelles, constituent le cœur du fonctionnement des systèmes continentaux et sont par nature sensibles aux forçages climatiques et anthropiques. L'étude des interfaces devrait impliquer de larges communautés pluridisciplinaires, mais le constat de Massei *et al.* que *"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"* semble toujours vrai et le besoin d'agréger un grand nombre de disciplines pour les caractériser et comprendre leur dynamique constitue encore un verrou majeur identifié par la communauté.

A l'exception du continuum homme-terre-mer (HTM) où les gradients mécaniques, chimiques et biologiques sont nombreux - les notions de "continuum" ou de gradients sont quasi absentes des contributions. L'une des raisons est sans doute que la détection de gradients dans la zone critique constitue un défi et qu'il est presque impossible de définir les limites spatiales -et temporelles- d'un continuum. Un continuum peut aussi être perçu comme une échelle d'intégration, une façon d'appréhender un milieu composé, à l'échelle fine, de nombreuses interfaces. Au total, les contributions sur la zone critique ont finalement évité cette question, car elles portaient essentiellement sur les échelles fines, où les continums sont manifestement absents.

Enfin, étant donné le caractère ubiquiste des interfaces et les variabilités spatio-temporelles associées, le périmètre de l'atelier est particulièrement vaste. Cette thématique recoupe ou intègre plusieurs ateliers de la prospective précédente : cycles, liens biotiques/abiotiques, interface atmosphère/SC, continuum HTM. Dans cette synthèse, nous distinguons 4 grands thèmes, qui s'enrichiraient de l'inclusion des SHS dans une approche multidisciplinaire : les interfaces OA/TS avec les SIC, le continuum HTM, l'interface Biotique/abiotique et les hétérogénéités des interfaces. Les compartiments OA TS bordant les SIC ayant fait l'objet de prospectives récentes, les réflexions en cours pourront se nourrir de celles déjà menées par ces communautés. La question est de savoir si d'autres verrous et/ou besoins sont apparus dans les contributions SIC ?

Grands thèmes

Interfaces avec OA TS

Les cycles biogéochimiques des nutriments (C, N, P) doivent être étudiés en lien avec l'eau et la végétation (ex : bassins versants, milieux forestiers, zones tropicales, zones humides), pour représenter les échanges de matière et d'énergie entre surfaces et atmosphère. Cela concerne notamment, les émissions et dépôts d'éléments nutritifs, de contaminants et de métaux ainsi que les particules d'origine biologique (ex : aérosols terrigènes, bioaérosols). Le couplage des modèles de surface avec les modèles atmosphériques est nécessaire pour une description plus fine des processus physiques et biogéochimiques en jeu, une meilleure représentation de l'hétérogénéité spatiale et temporelle des échanges, et du couplage végétation / eau / carbone / éléments. Le rapprochement SIC / OA vise à renforcer les approches biologiques, physiques et chimiques des processus et à représenter leurs interactions. Ce rapprochement est critique dans certains milieux complexes tels que les milieux urbains, les mangroves et les surfaces des zones polaires. A l'interface cryosphère / atmosphère, les zones polaires altérées présentent les prémices de potentiels bouleversements climatiques majeurs aux conséquences globales. L'interface SIC TS qui se manifeste entre autres par les activités volcaniques, n'a pas fait l'objet de contribution.

Continuum HTM

En complément des points identifiés dans les prospectives OA, les grands défis qui attendent le continuum HTM, siège d'enjeux majeurs sociétaux (variabilité de la ressource notamment en eau mais aussi trophique largement décrit dans l'atelier "ressources"), pollution des environnements, cycle biogéochimique du C, recul du trait de côte et remontée du niveau marin), portent sur (i) l'identification des puits de C et leur efficacité le long des corridors fluviaux et aux interfaces, (ii) l'intégration du cycle du C à l'échelle des continuums, (iii) la dynamique des échanges gazeux (CH₄) à l'interface des écosystèmes terrestres et aquatiques, (iv) la variabilité des flux de matières s.l. (incluant les contaminants) sous contraintes anthropiques (usage des sols) et climatiques (y compris événements extrêmes) en intégrant des scénarios prédictifs pour les prochaines décennies, (v) le filtrage des signaux climatiques par les propriétés internes des bassins versants qui altèrent l'expression du signal climatique sur les flux hydriques (voir aussi contribution OA et besoins analytiques), (vi) L'impact (e.g. biogéochimique) des apports marins aux interfaces (écosystèmes, cycle biogéochimique, sociétés humaines), (vii) la rétro-observation permettant de restituer les trajectoires des bassins versants ainsi que celles des écosystèmes pour raffiner les modèles prédictifs.

Interfaces biotique-abiotique

L'interface biotique/abiotique sépare les gradients de nutriments réversibles selon les saisons, qui reflètent le cycle biologique dans les sols peu profonds, des gradients d'altération chimique dans les sols plus profonds. Les interfaces biotiques/abiotiques sont cruciales pour le système de maintien de la vie, car elles purifient l'air, fournissent de l'eau potable et rendent les nutriments biodisponibles.

Nous sommes encore loin de comprendre comment les interactions biotiques soutiennent le fonctionnement des écosystèmes et quel rôle les différentes interfaces biotiques/abiotiques jouent dans la fourniture des molécules essentielles. En plus, les interactions ont le potentiel de modifier rapidement les processus écosystémiques par le renouvellement des communautés induit par le climat, la saisonnalité, les changements d'utilisation des sols et la pollution. Deux défis ont été soulignés à cet égard :

Enjeu 1. Propriétés et réactivité de la matière (vivante et non vivante) aux petites échelles

Approche mécaniste et intégrative pour la compréhension des processus mis en jeu dans les cycles biogéochimiques des éléments, isotopes ou molécules, exploration des chemins réactionnels et conséquences en termes de flux et bilans. Nécessité de couplage de processus abiotiques et biotiques (Ex : pour la dégradation de la matière organique).

Enjeu 2. Diversité du vivant et fonctionnement des écosystèmes

Faire le lien entre biodiversité (génétique, taxonomique, métabolique, fonctionnelle) et fonctionnement global des écosystèmes (ex : cycles biogéochimiques, ressources), sous contraintes environnementales. (Action et rétroaction).

Hétérogénéité des interfaces

L'étude et la prise en compte de l'hétérogénéité des interfaces sont engagées depuis de nombreuses années dans certaines disciplines telles que la télédétection et plus généralement les interfaces les plus accessibles des écosystèmes (hotspots et hot moments d'émission de GES par exemple). Cependant, l'hétérogénéité spatio-temporelle des interfaces et des gradients au sein de la zone critique et de ses interactions avec le vivant reste très peu explorée car les interactions entre ces compartiments sont localisées dans des zones discrètes, telles que la rhizosphère où la diversité microbienne est particulièrement riche, les gradients chimiques (pH, redox, CEC) nombreux et la pédogenèse plus intense. Au sein de la zone critique, l'hétérogénéité comprend également les chemins de l'eau, les propriétés physiques et chimiques des sols (eg. gradients de pH, redox, phase échangeable) et du front d'altération, la dynamique racinaire de la végétation pérenne, la biodiversité...

L'hétérogénéité des interfaces et continuum dans les SIC posent de nombreuses questions : Comment caractériser l'hétérogénéité à la fois dans le temps et l'espace, en particulier pour les zones les moins visibles et accessibles à l'observation, quel rôle joue l'hétérogénéité dans le fonctionnement des écosystèmes, quelles sont les échelles d'analyse et d'observation pertinentes pour identifier les processus et les intégrer dans la compréhension du fonctionnement des écosystèmes continentaux ?

Les besoins éventuels à discuter

Les besoins techniques pour l'étude des interfaces intra-SIC et notamment biotique/abiotique recouvrent aussi bien les techniques de préparation d'échantillons (organiques), l'adaptation des techniques de micro-caractérisation des matériaux (MO), que l'utilisation de méthodologies dérivées d'autres disciplines scientifiques comme la physique, la chimie ou la (micro)biologie (ADN). Les améliorations (seuils de détection) et l'application de techniques spectroscopiques et d'imagerie sont nécessaires. La résolution taxonomique et de la compréhension fonctionnelle des espèces microbiennes doivent également être établies grâce à l'utilisation d'une variété de techniques -omiques. Les techniques -omiques peuvent être couplées avec des approches alimentées par l'Intelligence Artificielle (IA) pour soutenir les analyses des voies complexes des interfaces biotiques/abiotiques, le flux de molécules dans les interfaces et l'impact des facteurs externes sur ces interfaces et leurs fonctions.

Démarches colocalisées - observation - expérimentation - modélisation

Il s'agit ici d'améliorer la quantification des flux (eau, matière, énergie) aux interfaces, des stocks (e.g. carbone), et d'appréhender leurs hétérogénéités spatiales et temporelles afin de permettre une modélisation réaliste des systèmes étudiés et de prédire leur évolution. Ceci implique de trouver la granularité de caractérisation et d'observation idéales pour que la taille et la complexité des modèles soient gérables. Les besoins sont donc multiples et essentiellement basés sur les systèmes d'observations, les méthodes d'analyses, la modélisation et les RH associées.

Observations : court/moyen/long terme

Couplage / intégration des observatoires et rétro-observatoires (archives sédimentaires et banques d'échantillons) des différents instituts INSU / INEE (SNO et des ZA, SHS).

Modélisation dans un contexte de Changements Globaux :

Il semble nécessaire de développer des chaînages de modèles à base physique intégrant ceux dédiés aux processus de mobilisation, de transfert de matière et de dépôt qui seront à combiner avec de nouvelles approches d'apprentissage automatique. Cette hybridation devrait pouvoir augmenter la puissance et la sensibilité des modèles classiquement utilisés dans l'étude des SIC. In fine, l'intégration de modèles climatiques, incluant la simulation des événements extrêmes, et ceux issus des SHS, comme données d'entrée, permettra d'apprécier l'impact des Changements Globaux au sein des surfaces continentales et du continuum HTM.

Points saillants à aborder lors du colloque de prospectives

- **Démarches colocalisées - observation - expérimentation - modélisation.** De nombreuses propositions relèvent la nécessité de colocaliser une large caractérisation (physique, chimique et biologique) du fonctionnement des géo-hydro-écosystèmes : quelles sont les priorités ?
- Comment développer **l'intégration spatiale et temporelle** pour comprendre et modéliser la variabilité du transfert de matière au sein des surfaces continentales et le long du continuum HTM ?
- Comment mieux comprendre les **interactions des micro-organismes entre eux et avec l'environnement** en ce qui concerne le cycle des nutriments et d'autres éléments essentiels aux interfaces petites échelles ?
- Comment mieux prendre en compte, dans les bilans, les **dépôts** atmosphériques (dont nutriments / carbone organique / micro-organismes voire toxines) qui influencent l'activité biologique des SIC ?

Potentielles zones de recouvrement avec d'autres ateliers

- Périmètre par rapport à l'atelier 1 urbain
 - Pas d'interface spécifique "urbain" identifiée
- Périmètre par rapport à l'atelier 8 "intégration des différentes échelles de temps et d'espace",
 - = Etude aux échelles où se produisent les processus => atelier 4
 - = Intégration => atelier 8
- Périmètre par rapport à l'atelier 5 "continuum science-société"
 - = impacts anthropiques => atelier 4
 - = sciences participatives => atelier 5
- Périmètre par rapport à l'atelier 7 "contaminants"
 - = Contaminations, remédiation, résilience, écotoxicologie => atelier 7
 - = Processus / échanges de contaminants aux interfaces => atelier 4
- Périmètre par rapport à l'atelier 6 ressource :

- = échange de matières aux interfaces => atelier 4
- = stock => atelier 6

Aspects transverses

Moyens humains

La question des moyens humains concerne en premier lieu le renforcement des compétences techniques. Les principaux besoins exprimés concernent d'une part l'acquisition et le traitement des données au sein des SNOs, et d'autre part des compétences autour de techniques d'analyse qui sont de plus en plus pointues et spécifiques. Plus largement, un besoin d'identifier les métiers rares, originaux, ainsi que les savoir-faire de la communauté, semblent un préalable indispensable afin de pouvoir les préserver.

Observations Low cost : Pour compléter les dispositifs de mesure, un réel besoin apparaît sur le développement de capteurs (low cost) compatibles avec les systèmes d'acquisition, et fonctionnels en toutes conditions.

Prospective SIC 2023

Document de synthèse préliminaire des ateliers

Titre de l'atelier	Continuum Sciences-Société et transdisciplinarité : co-construction de la recherche-action pour accompagner la transition des territoires
Nom(s), prénom(s), Adresse(s) mail des coordinateur.trice.s	Catherine Bertrand catherine.bertrand@univ-fcomte.fr Stéphane Vuilleumier vuilleumier@unistra.fr
Membres du groupe d'animation de l'atelier	Mélanie Raimonet ; Julie Aufort ; Daniel Gilbert ; Olivier Merlin ; Isabelle Ruin Nathalie Vigier
Date/version du document	21/01/2024

1/ Mode de fonctionnement de l'atelier

Le groupe d'animation a fonctionné en réunions régulières en visioconférence visant à :

- redéfinir les contours de cet atelier,
- proposer un titre qui regroupe les 3 thèmes qui composent cet atelier,
- se répartir l'analyse des contributions des trois thèmes entre les animateurs de l'atelier.

Le groupe a proposé un document de travail qui a été mis à la disposition de la communauté le 8/12/23, et discuté lors d'un webinar le 15/12/23 (13-14h).

Ce document représente une synthèse préliminaire de l'atelier et a vocation à préparer les réflexions et les échanges lors du colloque de prospectives.

2/ Contribution scientifique

Thème a - Continuum Sciences-Sociétés: Co-construction de la recherche autour d'enjeux d'habitabilité du territoire

Les sciences des SIC sont au cœur de l'observation et de la compréhension des processus à l'œuvre dans le dépassement de nombre de limites planétaires (changement climatique, cycles biogéochimiques, ressources en eau, changement d'usage des sols, intégrité de la biosphère, etc.). Les questions de recherche de la communauté SIC réunies dans le cadre du thème *Continuum Sciences-Société et transdisciplinarité* se situent à l'interface de plusieurs continua : biotique-abiotique, terre-mer, surface-atmosphère, sciences-société, fondamental-appliqué. Les contributions rassemblées font état de la conscience accrue des membres de notre communauté de la nécessité et de l'urgence à agir par la production d'une recherche utile à l'accompagnement des transitions socio-écologiques et énergétiques nécessaires à la préservation de l'habitabilité de nos territoires. Ainsi, ces recherches se positionnent au carrefour de différentes formes de savoirs et d'expertises scientifiques et locales pour une approche systémique et résolument inter- et transdisciplinaire des enjeux de soutenabilité.

De manière générale, l'analyse des interactions entre sociétés humaines et milieux, sous le prisme de l'impact humain sur les différents sous-compartiments étudiés, et avec une dimension territoriale et prospective forte, représente un point commun à l'ensemble des thématiques de recherche. Leur objectif global pourrait peut-être être résumé ainsi : contribuer à une vie en société de qualité pour l'ensemble des citoyens, en meilleure intelligence avec notre planète vivante et ses ressources.

De fait, notre communauté s'attache à atteindre cet objectif par le développement et le renouvellement de nos approches scientifiques et des moyens utilisés également. Nous souhaitons aussi renforcer le dialogue entre nos disciplines, en rassemblant les grands champs disciplinaires des SIC, SHS comprises, par une approche plus intégrée de l'analyse des dynamiques sociales qui vont sous-

tendre les évolutions futures. Pour cela, de nouvelles approches et retours d'expérience en matière de co-design des questions de recherche utiles pour l'action, ce qui nécessite de réfléchir à une démarche transdisciplinaire avant même le démarrage des projets, de co-construction de la science et co-évaluation et co-dissémination des résultats avec les parties prenantes pourraient être mis en avant. Cela implique notamment de penser la place des démarches participatives et intégratives en interaction étroite avec différentes parties prenantes telles que les pouvoirs publics, leurs structures opérationnelles, les citoyens, les professionnels de l'agriculture, de l'industrie dès le démarrage des projets. Ces nouvelles modalités d'intégration des besoins, des données et des savoirs territorialisés, par exemple dans le cadre de « living labs » est en mesure de faciliter l'appropriation et l'ancrage des résultats de la recherche pour une meilleure prise en compte de la dimension systémique propre à la complexité des géo-socio-écosystèmes étudiés. Nos projets bénéficieront évidemment de l'acquisition et de l'application de nouveaux instruments transverses, du renforcement et du renouvellement des modes d'analyse, et de gestion et de mise à disposition des données obtenues.

Thème b - Continuum Sciences-Sociétés: Transitions

Dans un contexte de transition énergétique, les interfaces (micro-)organismes-solution-minéraux sont au cœur des questions de production d'énergie durable et renouvelable, aussi bien à travers le développement de biocarburants, biogaz et biopiles que pour la production de H₂ ou le stockage de CO₂. Plus largement, les cycles bio-géochimiques des éléments et métaux stratégiques peuvent couvrir également des approches intégrées du manteau terrestre à l'impact environnemental. On retrouve ces interfaces et ces problématiques dans des environnements très divers et à différentes échelles, aussi bien dans les stations d'épuration qui constituent un maillon clé pour la transition énergétique que dans les mégapoles ou encore les estuaires impactés par l'extraction minière et potentiellement à terme par le stockage de H₂ et de CO₂.

D'autre part, le cycle de l'eau, et des éléments nutritifs et des divers polluants qu'elle transporte, au sein des compartiments des SIC sont fortement impactés par les activités humaines et sont associés à des processus physiques et biogéochimiques conduisant à une régulation des flux d'eau, de nutriments et de contaminants. Dans un contexte de transition socio-écologique, développer des recherches inter et transdisciplinaires avec les parties prenantes s'avère essentiel afin de pouvoir contribuer à identifier et réduire les sources de pollution, et quantifier et porter à connaissance le rôle des écosystèmes dans la régulation des cycles de l'eau, nutriments et contaminants.

Thème c - Continuum Sciences-Sociétés: Quels types de données obtenir, générer et analyser

La nécessité de travailler avec les acteurs des territoires et d'établir des partenariats sciences-sociétés pour la collecte de données participatives et la recherche sur les anthroposystèmes du futur a été soulignée.

La quasi-totalité des fiches a fait remonter des besoins sur le type de données nécessaires pour mener des recherches sur :

- les cycles de vie et dynamiques des populations ;
- la dynamique des écosystèmes régulateurs au sein des socio-écosystèmes ;
- la description et l'analyse de la biodiversité, du continuum Homme-Terre-Mer (hot-spot d'étude des pressions anthropiques sur les ressources naturelles, intégration des SHS pour la prédiction des flux de matières) ;
- le fonctionnement intégré des hydrosystèmes continentaux, des paléoclimats et paléoenvironnements ;
- le forçage terrestre et les processus aux interfaces ;
- les transferts de matière d'éléments majeurs (C, N, P, Si), les flux de matière ;
- l'anticipation de la contamination future de la ressource en eau ;
- les bioaérosols.

Il a été fait mention dans de nombreuses fiches de l'importance et du souhait généralement partagé de mener des recherches interdisciplinaires sur la base de jeux de données appréhendables par les scientifiques et par les décideurs publics.

Importance de la pluridisciplinarité sur les grands thèmes identifiés. De fait, que ce soit pour étudier la réponse des écosystèmes à ces pressions locales, mais aussi liées aux changements globaux, ou encore pour développer des biotechnologies fondées sur la nature, une plus grande pluridisciplinarité apparaît indispensable (hydrologues, géologues, géochimistes de l'environnement, bio-géo-chimistes, physico-chimistes des interfaces, écologues microbiens, écotoxicologues, etc). Celle-ci existe déjà en partie dans la communauté SIC, mais il faut la développer plus.

D'un autre côté, afin d'éviter que cette force ne constitue aussi une faiblesse, il semble nécessaire de fédérer au niveau organisationnel les différents acteurs autour de champs disciplinaires spécifiques. Ce besoin a été remonté par exemple par la communauté des modélisateurs du transport réactif. La fédération de ces communautés permettrait de mieux répondre collectivement aux appels à projets, qui tendent plutôt à opposer les visions thématiques et méthodologiques sans considérer les développements méthodologiques comme sujets de recherche à part entière. Enfin, il serait important de développer des travaux faisant réellement interagir les sciences de l'environnement avec les sciences économiques, humaines, sociales et juridiques à travers l'intervention de chercheurs disposant de compétences mono-disciplinaires et d'autres travaillant déjà à l'interface entre plusieurs disciplines très différentes.

(i) *Pistes de réflexions, incluant les axes de recherche et les innovations méthodologiques à développer,*

Axes de recherche

Changement climatique. Comment produire une science utile aux acteurs des territoires confrontés à l'augmentation des risques et des impacts climatiques ? Comment co-construire et co-évaluer les services climatiques de demain pour faire face aux enjeux locaux d'anticipation, d'atténuation, d'adaptation et de transformation des socio-écosystèmes face aux effets des changements climatiques ?

Perturbation des cycles biogéochimiques. Compréhension de l'importance des activités humaines dans les modifications des cycles biogéochimiques à l'échelle territoriale, des processus d'économie circulaire liée à ces cycles biogéochimiques et des risques environnementaux associés.

Ressources en eau. Eau bien commun, élément indispensable à la vie et aux activités socio-économiques et fortement soumis aux forçages climatiques et anthropiques (usage des sols). . La perturbation du cycle de l'eau altère le fonctionnement global des socio-écosystèmes, dans sa dimension écosystémique comme pour les activités socio-économiques. La restauration des paysages hydriques et la modification des usages impliquent de mettre en œuvre des approches intégrées des socio-hydrosystèmes, de la gouvernance et de la gestion des ressources (qualité, quantité) et des usages :nexus eau-énergie-agriculture.

Changement d'usage des sols. Dégradation des sols et des milieux naturels sous l'effet des activités humaines (urbanisation, artificialisation, agriculture, industrie, etc.), la ville comme territoire-clé/emblématique du rapport homme-milieu : des interactions climat/formes urbaines à l'échelle micro-locale aux impacts pour la santé humaine.

Erosion de la biodiversité. Pour une compréhension intégrée des socio-écosystèmes, approche One Health, santé humaine et santé environnementale sont indissociables. Aspects-clés: représentation et modélisation intégrées des socio-écosystèmes, services écosystémiques (ressources, valorisation biotechnologique, application pour la santé), conservation et restauration des milieux et de la biodiversité, résilience des socio-écosystèmes, compréhension des déterminants environnementaux de la santé des socio-écosystèmes et leur prise en compte dans les politiques publiques.

Innovations méthodologiques à développer

Approches systémiques, trans- et inter-disciplinarité (radicale), recherches orientées solutions, recherche-action territorialisée, living labs, observations et modélisation intégrée/couplée (processus biophysiques et sociaux, vivant/non-vivant), formation au développement durable/transition, observatoires des impacts anthropiques long terme (30 ans), nouvelles plateformes et sites eLTER, stations expérimentales en mer, sciences participatives pour l'observation des socio-écosystèmes (données manquantes, meilleur échantillonnage spatio-temporel, croisement des enquêtes et questionnaires utilisés en SHS et des relevés de terrain et collectes d'échantillons menés en sciences de l'environnement, etc.).

On voit que la communauté SIC entend bien s'emparer des derniers développements technologiques numériques (IA, machine learning, architectures exascales, GPU, etc.) et des concepts et théories en physico-chimie les plus récents (théorie non-classique de la nucléation cristalline par exemple).

Sur le plan méthodologique, de nombreux besoins de couplages sont également relevés (analyses moléculaires de l'isotopie aux observations avec le multi-échelle/modèles globaux, modèles de transport réactif avec les approches IA p. ex.). La vigilance est toutefois recommandée pour que ces approches complémentaires restent identifiées, c'est à dire qu'il s'agit de bien maintenir de la modélisation physico-chimique directe en parallèle à de l'IA, et de bien maintenir de l'atomistique-moléculaire en parallèle au global et au multi-échelle.

Nouvelles technologies/ progrès technologiques

- Miniaturisation des composants, nouveaux moyens de télétransmissions Télécom
- Développement de capteurs low cost
- Sources de modèles 3D à haute ou très haute résolution - lidar aéroporté/terrestre, photogrammétrie low-cost par drone, stéréo satellitaire
- Nouveaux préleveurs passifs avec des niveaux de détection plus faible que les simples échantillonnages directs
- Evolution des techniques d'analyses permettant la caractérisation et la répartition de la dynamique des micropolluants/pesticides/bioaérosols
- L'AI en complément des approches multicapteurs-multiéchelle
- Développements méthodologiques et techniques pour l'acquisition de données (physique, chimie, biologie, écologie, etc.) en milieux isolés,
- Développement d'un parc instrumenté national pour l'observation des flux pendant les événements extrêmes ainsi que l'acquisition de données, par exemple pour les aérosols
- Créer de nouvelles générations d'observations connectées orientées vers une acquisition « intelligente » des données, optimisant ainsi la consommation d'énergie et le stockage de données, et permettant d'interfacer les différentes mesures à travers des outils tels que l'internet des objets (IoT).
- Application 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
- Outils peu ou pas utilisés dans la communauté SIC avec ce qu'ils recèlent de nombreuses potentialités

Spatialisation de la mesure

- Capteurs low cost facilitant l'acquisition de données spatialisées
- Données satellites augmentant la résolution spatiale
- Analyses couplées : topo/végétation/infrastructure/bathymétrie/zone peu profonde, ou encore géochimie / génomique
- Spatialisation des usages/approche agronomique
- Approche multicapteur-multiéchelle (image satellitaire-processus au niveau des sites d'observation)

Types de données

- Rétro-observations pour étudier les trajectoires passées ou pour établir des scénarios climatiques ou hydrométéorologiques pertinents non encore disponibles dans les projections hydroclimatiques.
- Séries temporelles/mesures directes des vitesses d'évolution des éléments constitutifs des paysages et autres mesures
- Contaminants émergents en constante apparition dans la zone critique
- Données permettant l'analyse des dynamiques sociales pouvant sous-tendre les évolutions futures
- Changements côtiers liés au pergélisol

Utilisations de la donnée

- Modélisation numérique/conceptuelle en lien avec les services d'observation
- Données sur les pollutions (transferts de pesticides p. ex.) à relier avec les bases de données disponibles au niveau national

Besoins à discuter

Enjeux-clés

Collaboration inter-organismes, données dispersées, approches en silos, modélisation intégrée de la zone critique intégrant les dynamiques anthropiques et leurs évolutions futures, acceptabilité sociale, rétroactions climat/surfaces continentales à l'échelle des socio-écosystèmes locaux (territoires), verrou des modes d'évaluation différents selon les disciplines.

Besoin de discuter sur le terme continuum science société afin de lever toute ambiguïté.: Qu'entend-t-on précisément par continuum science société ?

Besoin de bien définir le terme "continuum" et comment notre communauté le conçoit en termes d'interactions et de co-construction avec les différents types d'acteurs de la société (collectivités, entreprises, associations, citoyens). Interactions et co-construction à exercer et pratiquer ensuite sur des projets concrets de recherche-action.

Verrous institutionnels

Le mode actuel de financement de la recherche sur réponse aux appels à projets ne permet pas d'implémenter sur le long terme des observatoires, pourtant nécessaires pour évaluer les impacts anthropiques, par exemple de l'éolien en mer sur la dynamique des écosystèmes marins.

Identifier les effets de la transition dans la société : y-a-t-il des impacts ou pas ? est-ce que l'on accompagne la société dans la transition ? Pour le moment, pas d'interfaçage explicite, pas d'interfaçage institutionnel- besoin manifeste d'avancer avec notre tutelle sur ce point. Par exemple pour les transitions socio-environnementales (alimentaire, énergétiques, écologiques), l'impact est fondamental et une question majeure de ce thème.

Proposer une recherche innovante avec la société civile qui n'a pas forcément vocation à avoir une valeur économique directe (référence à la direction de l'innovation et des entreprises). Il existe des méthodologies de la prise en compte des innovations avec des aspects autres qu'économique. Retour d'expérience des organismes comme le CIRAD ou l'INRAE qui mettent en place des outils d'évaluation.

Verrous scientifiques

- cloisonnement disciplinaire, cloisonnement des communautés «continentale» et «marine»
- niveau de complexité des SIC, prise en compte des discontinuités/hétérogénéités au sein des SIC
- couplages de modèles pour une prise en compte de l'ensemble du continuum homme-terre-mer
- couplage de modèles basés sur des technologies très différentes et ayant des temporalités et des ressources de développement hétérogène
- scénarisations

- incertitudes : propagation des incertitudes le long des chaînes de modélisation terre-mer, développer des démarches méthodologiques pour mieux prendre en compte l'incertitude liée à la variabilité climatique naturelle
- besoin de faire évoluer les techniques d'analyse pour caractériser la répartition et la dynamique des micropolluants

verrous : interaction avec la société civile

Les observations participatives représentent un type de données à acquérir ou à développer qui n'est pas explicité dans les fiches, mais qui est d'importance. Comment le déploiement de capteurs peut devenir des outils pour des enjeux des territoires ? mais avec qui ? uniquement chercheurs ou avec le grand public ? terrain de jeux avec les zones atelier-sno ; prendre exemples issus du services climatiques

Il y a un réel manque dans les fiches concernant comment faire remonter les questions posées par les territoires, et avec quel jeu de données. Beaucoup de données sont acquises par les acteurs de la société civile, comment les intégrer à notre réflexion scientifique?

Quid des transitions socio-environnementale-écologiques co-construites avec les acteurs du développement des territoires?

Prise en compte de l'histoire : histoire des non transitions : il s'agit de la première transition réalisée. Comment établir un corpus de références, établir une méthodologie d'analyse etc .

Plusieurs points ont émergés de la discussion lors du webinar

- Identification des parties prenantes ? de qui parle-t-on: collectivités territoriales ? associations ? industries ? Il faut les identifier et établir des collaborations avec elles. Parties prenantes multiformes : incluent la collecte de données, sciences participatives, co-construction.
- Lien avec la discussion qui a émergé lors de la réunion CS SIC ; lien avec le grand public souhaité, mais dans la communication, comment se positionner face à la désinformation et à la mauvaise utilisation des résultats scientifiques
- Comment bien retranscrire les questionnements de la société pour bien répondre à leurs attentes?

Liens avec la quasi-totalité des autres ateliers

- *Lien fort avec le thème 6: Production d'énergie et impacts environnementaux*

- *En lien avec les IR et SNO: 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 ; la caractérisation de la glace et du manteau neigeux (SNO glacioclim).*

- *En lien avec la qualité des ressources/territoires : micropolluants/contaminants chroniques ou diffus*

3/ Aspects transverses

Couplage avec la société

Sur le plan du couplage avec la société, il faut noter que la demande de création de nouveaux observatoires comme sur l'impact de l'éolien mer répond aussi à une demande d'acteurs locaux de la société et d'usagers de l'espace maritime, et pas seulement des chercheurs. Une proposition est également faite d'intégrer les stations d'épuration dans des « living labs » interdisciplinaires et ouverts

sur la société civile, pour une vision socio-écosystémique intégrée et renouvelée de la gestion de l'eau et du traitement des eaux usées.

Point d'accroche côtier : site atelier-solutions potentielles pour mairie et communes, valeur touristique à faire valoir (aire marine protégée (Nice) , une co-construction car il y a une volonté politique et scientifique de protection et valorisation).

Quelle perspective pour des interfaces productives avec la sociologie (analyse du jeu des acteurs) ? et la psychologie (questions de cultures scientifiques différentes selon les disciplines, aussi pour les interactions scientifiques, et biais cognitifs) ? comme contribution utile voire essentielle aux projets de recherche-action interdisciplinaires et de leur co-construction ?

par exemple quand on présente un projet d'infrastructure, on ne comprend pas toujours ce qui pose problème aux personnes qui sont contre ce projet ? Qu'est-ce qui dérange ou pas ? Comment finalement prendre en compte la perception des humains sur les paysages ? Comment s'approprient-on les paysages ? qu'est ce qui fait que l'on peut les modifier sans que cela pose problème ou au contraire provoque des réactions très vives des personnes (exemple construction d'infrastructure permettant d'améliorer des manques en énergie, en eau

4/ Eléments éventuels pour alimenter le bilan des dernières prospectives

Sans objet pour le moment.

Prospective SIC 2023

Document de synthèse préliminaire des ateliers

Titre de l'atelier	Stocks et ressources naturelles (eau, carbone et métaux critiques) : leur durabilité dans un contexte de changement global et de limites planétaires
Nom(s), prénom(s), Adresse(s) mail des coordinateur.trice.s	Christelle Marlin et Juliette Blanchet christelle.marlin@universite-paris-saclay.fr juliette.blanchet@univ-grenoble-alpes.fr
Membres du groupe d'animation de l'atelier	Pierre Barré, Julien Boé, Jean-Martial Cohard, Yoann Copard, Carole Dalin, Jérôme Demarty, Bertrand Guenet, Florence Habets, Lionel Jarlan, Clément Levard
Date/version du document	30-01-2024

1/ Mode de fonctionnement de l'atelier

L'Atelier comporte 12 membres. Il s'est réuni 4 fois depuis début novembre 2023.

Dans un premier temps, les différentes étapes du travail ont été les suivantes:

1. Réflexion en groupe sur le périmètre de l'atelier, ce qui a conduit l'atelier à s'intituler « Stocks et ressources naturelles (eau, carbone, énergie et métaux critiques) : leur durabilité dans un contexte de changement global et de limites planétaires »
2. Lecture et synthèse des fiches Prospectives SIC issues de la consultation de l'été 2023
3. Travail sur une proposition de plan mettant en avant les grandes questions scientifiques et méthodologiques autour des principaux stocks et ressources naturelles (en SIC), leurs interactions (à travers de nexus), les interfaces avec les autres domaines de l'INSU et instituts du CNRS et les nouveaux besoins en matière d'outils.

Dans un deuxième temps, un document martyr a été préparé pour un partage avec la communauté avant le colloque de prospective. Celui-ci contient les grandes questions scientifiques identifiées pour le thème de l'Atelier. Ces grandes questions sont celles identifiées 1) dans les fiches de la consultation de la communauté SIC durant l'été 2023 et 2) par le groupe de travail préparant l'Atelier 6. Mise en ligne : 8 - 25 janvier 2024.

2/ Contribution scientifique

Vous trouverez dans cette partie le bilan des contributions scientifiques à l'Atelier 6 que nous avons choisi d'organiser à ce stade 1) en grandes catégories de ressources et de stocks de ressources naturelles (avec des problématiques qui leurs sont propres) et 2) en plusieurs grandes questions scientifiques (défis) inter-ressources/stocks.

2.1 Les grandes catégories de ressources identifiées en SIC sont les suivantes : 1) Ressources en eau, 2) Ressources trophiques, bio, nutritives - stocks bio, 3) Stocks de carbone, 4) Ressources énergétiques (Basse Température), 5) Ressources minérales.

1) **Ressources en eau**

- Ressources en eau, "anthropisation" et/ou changement climatique
- Apport de l'AI dans la connaissance des ressources en eau
- Hydrogéologie urbaine : aquifères, recharge/nappes et qualité des eaux
- Salinisation des hydrosystèmes côtiers
- Ressources en eaux et contaminants
- Ressources en eau alternatives (par exemple : les eaux usées)
- Mieux quantifier la recharge des aquifères par des approches multi-méthodes (en y incluant une valorisation des données de lysimètres)

2) **Ressources trophiques, bio, nutritives - stocks bio (titre et contenu à revoir)**

- Altération de la ressource trophique (biodiversité aquatique) par la pression anthropique et le changement climatique (surtout en milieux côtiers et estuariens)
- Enjeux liés au cycle biogéochimique N et P : impact de l'Homme sur N et P associé à une perturbation des écosystèmes (nitrates, eutrophisation) aquatiques ainsi qu'une diminution de la ressource en eau.
- Biomasse et leur transformation. *A développer.*

3) **Stocks de carbone**

- Vers une meilleure caractérisation et modélisations des stocks et des flux dans les écosystèmes continentaux / puits naturels/ émissions futures des projets de nouvelles exploitations d'hydrocarbures envisagées par l'industrie. A discuter.
- Étude géochimique de ressources minérales, des réactions impliquées dans le captage, stockage et valorisation du CO₂

4) **Ressources énergétiques (Basse Température)**

- Bioréacteurs : les interfaces solide-solutions-microorganismes dans des stratégies de production d'énergie durable et renouvelable
- H₂ naturel (énergie naturelle des roches)
 - Rôle des microorganismes consommant ou produisant de l'hydrogène
 - Quelle vision de l'interface souterrains profonds/"surface" ?
- Impact environnemental liée à l'exploitation
 - Utilisation et le (non) recyclage des matériaux des énergies non renouvelables
 - Contrôle de l'intégrité à long terme des réservoirs et les processus chimiques et biochimiques in situ (CO₂, H₂)

5) **Ressources minérales**

- Cycles bio-géochimiques des éléments stratégiques / Nécessité d'une approche cycle de vie et multidisciplinaire/interdisciplinaire & Caractérisation et dynamique des particules anthropogéniques
- Formation, Croissance, Stabilité
- Impact environnemental (pré- et post-exploration) de l'exploitation des ressources minérales
 - Compréhension des interactions multiples des cycles bio-géochimiques des métaux critiques et de leurs perturbations
 - Gestion des stériles miniers
 - Exploitations en milieu arctique
 - Compréhension de la résilience des écosystèmes perturbés
 - Effets des perturbations liées à l'extraction minière en milieu profond
 - Risques de contamination et de perturbation des écosystèmes par la minéralurgie urbaine
 - Développement de procédés sobres d'extraction de métaux critiques
- Exploration de nouveaux gisements de métaux critiques (sources primaires, secondaires, mine urbaine)
- Pressions sur les gisements de métaux critiques dans le Sud global pour décarboner les énergies des pays du Nord

A discuter lors des prospectives à St Malo

Manque identifié sur le ressources en sols *Pas de fiches clairement sur le sujet*

2.2 Les questions de recherche ont entre autre été déclinées pour les milieux particuliers que sont l'urbain, la forêt, les montagnes, les zones humides, les zones intertropicales, le pergélisol, les karsts, les interfaces terre-mer, les territoires du futur (sous le prisme des bassins versants, impactés par le changement climatique, l'urbanisation, l'agriculture intensive, etc.)

2.3 Les pistes de réflexion de recherche plus transverses peuvent être catégorisées en 5 grands défis :

- Défi de l'intégration de la composante humaine dans la modélisation des ressources, afin de répondre au mieux aux enjeux sociétaux autour des ressources se posant dans le contexte des changements globaux.
 - Comment mieux comprendre, caractériser et simuler les socio-hydrosystèmes, en prenant en compte les influences humaines (comme l'irrigation et les stockages, changement d'usage des sols comme la déforestation...), en faisant le lien si besoin avec les problématiques socio-économiques, de santé (contamination etc.) ou d'énergie.
 - Comment quantifier et prendre en compte des impacts multiples du recul de la cryosphère, actuels et futurs, sur les ressources à usages socio-économiques dans les

massifs (par exemple eau potable, neige de culture, hydroélectricité) et plus à l'aval (irrigation, refroidissement des centrales nucléaires, etc.).

- Comment évaluer l'impact de l'urbanisation sur le comportement hydrodynamique des nappes (imperméabilisation des sols, fuites de réseaux, ouvrages souterrains...) ?
- Comment mieux comprendre le couplage Homme / Climat sur la qualité de l'eau à la fois dans les bassins versants mais aussi aux interfaces Terre-Mer.
- Quelle perturbation anthropique de la ressource en N (atmosphère) et P (Terre interne) via leur utilisation comme fertilisants agricoles ou les lisiers ?
- Quelle durabilité et évolution des stocks de carbone, quelle sensibilité au changement global, quels effets des changements des pratiques agricoles sur les stocks à long terme (fraction labile et réfractaire) et quels scénarios sous impact du changement climatique ?
- Comment modéliser l'évolution de la ressource en carbone en intégrant des modèles climatiques et macro-économiques ?
- Comment anticiper l'impact cumulé des réservoirs et des seuils/obstacles à l'écoulement sur les différents compartiments : hydrologie, hydrogéologie, sédiment, température, biodiversité... ?
- Proposer et réaliser un scénario géographique, hydrologique et socio-économique de reméandrage de cours d'eau (inverse de la linéarisation généralisée dans les 50 dernières années) à l'échelle des masses d'eau de gestion comme alternatives aux petites retenues et bassines qui ne fonctionnent ni pour les conditions extrêmes humides ni sèches.
- **Défi de la caractérisation correcte des incertitudes en jeu, de l'amélioration des modèles et des méthodologies**
 - Quel potentiel de nouvelles approches basées sur l'IA, ou d'approches hybrides Machine Learning / modélisation physique pour réduire le coût numérique de la modélisation classique, améliorer la représentation des processus sous-maille, améliorer la qualité des modèles, et pouvoir estimer plus finement les incertitudes en jeu ?
 - Quelles nouvelles approches de scénarisation complémentaires à l'approche classique basées sur l'utilisation de projections climatiques, en raison des déficiences éventuelles des modèles climatiques (sous-estimation de la variabilité basse fréquence etc.) et meilleure caractérisation de la variabilité naturelle ?
- **Défi autour de l'interaction entre les ressources**
 - Quelles interactions entre carbone, azote et eau ? dans le cadre de l'usage des sols et des changements d'usage des sols: déforestation (ou reforestation), expansions de cultures/prairies (ou leur abandon). Besoin de modèles intégrés de la parcelle au continent, avec les données correspondantes.
- **Défi autour du Nexus Eau-Alimentation - Energie**
 - Quelles solutions (transitions agro-écologiques) pour une gestion durable des ressources en eau dans les agro-écosystèmes ? Comment préserver les sols pour une production alimentaire durable et saine ?

- **Défi de l'observation**

- Besoin d'observations acquises sur une très large gamme d'échelles spatiales pour quantifier les stocks, les flux, les processus et les taux de renouvellement des ressources.
- Valorisation des données satellitaires en particulier celles acquises lors des missions récentes ou à venir (ex : SWOT, FLEX, BIOMASS, TRISHNA, GRACE-FO, CIMR), avec évaluation du potentiel d'utilisation conjointe de type multi-capteurs et/ou multispectrale.
- Développement de nouvelles méthodes bas-coûts et bas-carbone (cf. Terra Forma), dans le but d'augmenter la résolution spatiale et/ou temporelle des réseaux d'observation. Intérêt potentiel pour les suivis de la pluviométrie en milieu urbain, des usages agricoles, de l'état général des sols ou l'étude des changements de volume (nappes, lacs, rivières et glaciers).
- Valorisation et dissémination des données des réseaux d'observation, notamment celles diffusées au travers de portail de données (THEIA-OZCAR), mais aussi vers le grand public et les décideurs.
- Développement de protocoles d'observation, tels que ceux des flux de contaminants, de quantité et qualité (labile / réfractaire) de la matière organique stockée. Croisement des différents types de mesures (hydrologiques, écophysiologicals, géophysique, géochimie, spectroscopie, ...).
- Poursuivre l'effort de co-localisation et d'intégration des observations engagé depuis CRITEX, OZCAR en particulier avec les ZA dans la dynamique eLTER avec une approche WAILS dans le but d'y acquérir une connaissance toujours plus intégrée du fonctionnement de la zone critique et de la disponibilité/renouvelabilité des ressources.
- Besoin de renforcer, par des dispositifs d'observation de référence in-natura (lysimètre, collecteur/préleveur, ...), les interfaces atmosphère-surface et surfaces, zones privilégiées d'interactions des processus éco-hydro(géologiques) et où des incertitudes demeurent sur la plupart des flux d'eau (pluie, ETR, recharge), de carbone et de matière (N, P, minéraux ...).
- Sciences participatives pour l'évaluation des ressources et des stocks : intérêt de les développer ? pour répondre à quelle(s) question(s) ? pour des réseaux existants, mais dont l'extension spatiale décroît ?
 - Intégrer la société civile dans les observations/questions de recherche. Proposition de création de « living labs » interdisciplinaires et ouverts sur la société civile afin de promouvoir une vision socio-écossystémique intégrée et renouvelée des ressources.
 - Créer un réseau participatif d'observation des assecs, de mesures piézométriques, de mesures pluie/neige/température,
- Besoin de reconstruire des données d'archives décrivant l'état et la variabilité long terme des stocks et des usages (exploitation d'image déclassifiées, carotte de sédiment, rapports d'archive, ...).

3/ Aspects transverses

Décrire les aspects transverses (formation (apprentissage, continue, ...), moyens, les RH/métiers/compétences/outils à maintenir/développer/inventer, l'égalité des chances, Recherche au Sud, responsabilité environnementale ...) identifiés lors du travail préliminaire en atelier (non finalisé).

Exprimer les besoins éventuels qui seraient spécifiques aux aspects transverses à discuter et à qui ils doivent être adressés.

- Besoin de recherches interdisciplinaires transverses impliquant les SHS, permettant l'intégration des connaissances sur le fonctionnement socio-hydrologique des bassins versants.
 - Besoin d'interdisciplinarité impliquant biologie / chimie / physique.
 - Besoin de renforcer les observatoires permettant de lier les communautés OA/SIC/TS et plus généralement de renforcer les discussions entre communautés (OA - SIC - SHS - INC – INSB).
 - Permettre l'amélioration de la mise à disposition des données (IR et au-delà).
 - Développer des compétences autour des big data et de l'IA.
 - Développer la recherche comme la formation portant sur l'étude des ressources naturelles vers l'économie, le droit ou la sociologie.
 - Développer des filières de formations transversalement entre le vivant (socio-écosystèmes) et le milieu physique.
 - Comment permettre que les décideurs et les politiques publiques sur les enjeux des ressources se fondent sur les dernières connaissances dans le domaine ?
- Transversalement à tous les ateliers : Faire un bilan de l'existant : quelles données pour quels modèles pour répondre à quelles questions ? Les données nécessaires sont-elles inexistantes ou ne sont-elles pas accessibles ?

4/ Éléments éventuels pour alimenter le bilan des dernières prospectives

Identifier les éléments de bilan des dernières prospectives SIC 2017-2022 (~≤10 lignes – non finalisé) qui ont été traités et comment ceux-ci alimentent la présente prospective (par ex : nouvelles thématiques/compétences, nouveaux outils/métiers qui n'auraient pas été identifiés lors des dernières prospectives, thématiques qui auraient particulièrement avancé ou bien au contraire qui n'auraient pas pu se développer au regard des objectifs annoncés dans les dernières prospectives).

Les ressources n'étaient pas identifiées comme un thème fondateur mais se retrouvaient de manière diffuse dans le document de prospectives 2013-2017 notamment dans le chapitre "flux de matière, d'énergie, altération, érosion".

Prospective SIC 2023

Document de synthèse préliminaire des ateliers

Titre de l'atelier	Contaminants et pollutions : devenir, impacts et solutions
Nom(s), prénom(s), Adresse(s) mail des coordinateur.trice.s	Rémi Marsac, Clémentine Fritsch, Jean Martins
Membres du groupe d'animation de l'atelier	Emilie Muller, Eléonore Resongles, Jérôme Labanowski, Corinne Casiot, Aurélie Cébron, Guillaume Morin, Gudrun Bornette, Gwenaël Imfeld, Fabienne Petit
Date/version du document	30/01/2024

1/ Mode de fonctionnement de l'atelier :

Grâce aux nombreuses contributions reçues cet été (une quarantaine étant en lien avec les contaminants), les animateurs de l'atelier ont réalisé une première synthèse sous forme de post-it sur 2 tableaux blancs (diapositives Google Slide, équivalentes à Powerpoint) afin d'extraire :

Un catalogue de mots-clés (Objets, milieux cibles, processus, outils, enjeux sociétaux)

Les questions scientifiques et verrous proposés par la communauté

Ces documents ont été ouverts à la communauté pour commentaires et suggestions. Un document de synthèse préliminaire a ensuite été produit sur cette base par les animateurs et membres de l'atelier, grâce à des réunions hebdomadaires visant à identifier des thèmes et perspectives scientifiques fortes et transverses, des innovations méthodologiques à développer, des évolutions nécessaires de l'organisation/structuration de la communauté et des moyens pour y parvenir.

Le document a été ouvert à la communauté pour commentaires et suggestions. La présente version a été amendée en tenant compte des remarques des contributeurs(trices) et des membres de l'atelier.

2/ Contribution scientifique :

Plan :

- I) Contaminants, milieux et contextes (d'intérêts) émergents
- II) Exposition et impact sur le vivant : du moléculaire aux écosystèmes
- III) Environnement et Santé, perspective "One Health"
- IV) Enjeux, données et modèles
- V) Contaminants et SHS

I) Contaminants, milieux et contextes (d'intérêts) émergents

Les territoires sont soumis à des contaminations multiples, anciennes ou émergentes, et au changement climatique. Les limites planétaires imposent de concilier dans le futur développement durable, préservation de la qualité des ressources (eau, sols, biodiversité...), et santé humaine et celle des écosystèmes (*Liens Atelier 6*) (Fig. 1).

1) Des progrès importants ont été accomplis ces dernières années sur la compréhension et la prédiction du devenir des contaminants réglementés ainsi que sur leurs effets dans les compartiments principaux de la Zone Critique comme les sols et les eaux de surface. Des avancées restent toutefois nécessaires en ce qui concerne les milieux rares et/ou très sensibles, les environnements de transition ou extrêmes, les environnements stratégiques (interfaces entre milieux, zones humides, milieux côtiers et estuaires, milieux insulaires, mangroves, zones non-saturées, zones karstiques, milieux de hautes altitudes et polaires...). Les milieux fortement anthropisés, urbains (*Lien Atelier 1*), ou encore les nouvelles zones d'exploitation minière (*Lien Atelier 6*), sont aussi des objets d'étude à privilégier dans le futur, notamment dans les territoires du Sud et autres régions où les effets des changements globaux sur les (socio)écosystèmes sont plus exacerbés. Des problématiques de contaminants émergents se multiplient en lien avec les évolutions sociétales et la pression anthropique (Fig. 1).

2) Le décryptage des mécanismes de transfert des contaminants entre les différents compartiments de la Zone Critique et la prise en compte de leur temporalité restent essentiels. Une meilleure prise en compte des effets combinés des conditions hydro/bio/géo/pédologiques et climatiques pour appréhender le devenir, la dynamique des contaminants et les trajectoires de la contamination est indispensable. Le rôle des interfaces redox, de la chimie radicalaire et des colloïdes, entre autres, dans le devenir et les impacts des contaminants organiques et inorganiques, notamment au sein des zones de transition entre compartiments environnementaux, reste ainsi encore mal compris. Enfin, dans un contexte de dérèglement climatique, il importe d'intégrer à cette problématique l'impact d'événements extrêmes (sécheresses/vagues de chaleur, événements pluvieux, crues, inondations, incendies, etc.), dont la fréquence est en constante augmentation.

3) Un défi important actuel et à venir est la détection des nouveaux contaminants/polluants, souvent appelés émergents ou d'intérêt émergent. Il s'agit notamment de molécules pharmaceutiques, de "PFAS", des micro ou nanoplastiques, d'éléments traces métalliques technologiquement critiques, et/ou leurs produits de dégradation (ces derniers pouvant être plus toxiques que les molécules mères). D'autant que les contaminations chimiques environnementales impliquent souvent des substances en mélange. À ces contaminants chimiques s'ajoute l'exposition, parfois simultanée ou séquentielle (multistress), à des contaminants biologiques (virus, bactéries et moisissures pathogènes, toxines, agents transmissibles non conventionnels...) ou à des pollutions physiques (e.g. rayonnements, ondes électromagnétiques, lumière, bruit). Un autre défi majeur est celui de l'évaluation des risques environnementaux et sanitaires associés à ces contaminants ou situations de contamination d'intérêts émergents et aux potentiels "effets cocktail" liés aux multi-expositions.

Certains de ces polluants sont en lien avec la transition énergétique et verront leur utilisation et leur recyclage augmenter, entraînant par conséquent des modifications de leurs flux et de leurs cycles biogéochimiques, avec un risque éventuel de pollution environnementale (e.g. terre rares, éléments métalliques critiques, Li, etc...). De même, les changements globaux et les transitions sociétales obligent à de nouvelles pratiques (e.g. réutilisation des eaux grises ou usées) dont les risques de contamination associés (e.g. devenir et transformation des contaminants) restent encore à étudier et documenter. De nouvelles approches méthodologiques, comme par exemple les approches d'analyses non ciblées ou dirigées par les effets, doivent être développées afin de mieux anticiper les risques associés.

4) Enfin, l'amélioration des approches de remédiation et de mitigation de tous les impacts listés reste au cœur de nos futures préoccupations pour préserver autant que possible tous les

compartiments de la zone critique. Ainsi, le développement de méthodes innovantes (atténuation naturelle, assistée, chimie verte et chimie durable...) de traitement/valorisation des différents types de déchets, de traitement de l'eau, des sols et de l'air, est aujourd'hui crucial et nécessite une forte interaction avec le génie des procédés et l'ingénierie écologique (*lien avec l'atelier 6 ressources*). Ceci se fera notamment dans un contexte indispensable d'économie circulaire et de solutions fondées sur la nature, impliquant notamment les micro-organismes, connus pour impacter significativement la dynamique des contaminants, parfois au travers de synergies biotique/abiotique et biotique/biotique. La spécificité de la communauté SIC est de pouvoir appréhender ces problématiques au travers d'approches interdisciplinaires couplées permettant d'identifier les mécanismes, à différentes échelles, de la molécule au bassin versant, et aux interfaces vivant/non vivant, et caractériser l'intensité et les cinétiques des réactions étudiées, en prenant notamment en compte les effets à long terme (e.g. anciens sites industriels ou miniers qui pourraient devenir des observatoires) *via* l'observation, l'expérimentation et la modélisation.

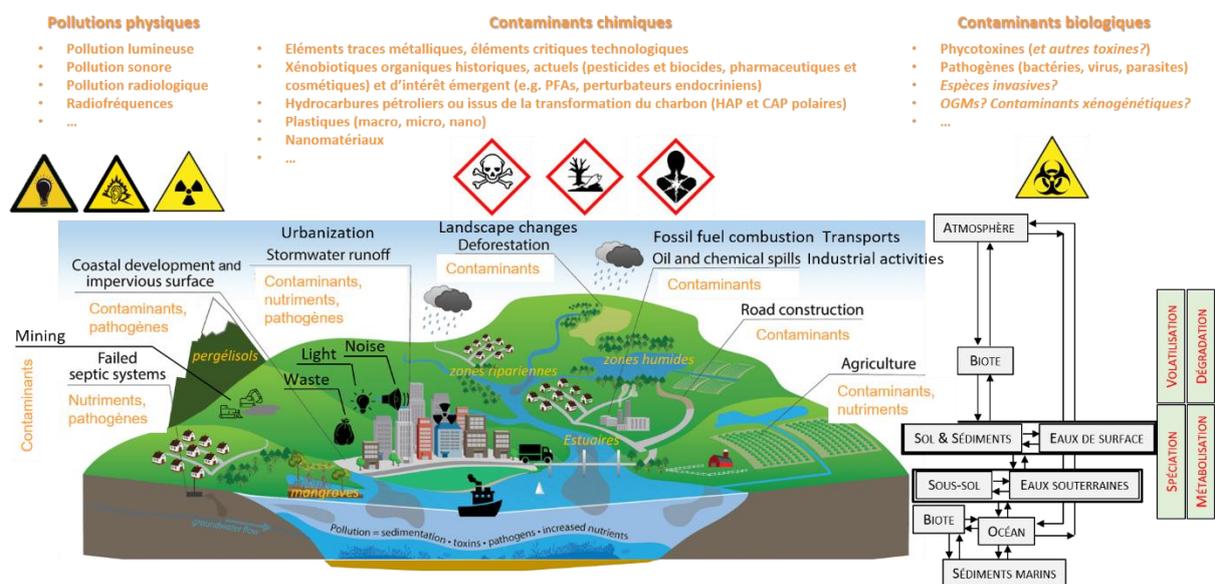


Figure 1. Schéma général illustrant les principales pollutions et contaminations dans le contexte des surfaces et interfaces continentales, leurs sources et certains des processus en jeu.

II) Exposition et impact sur le vivant : du moléculaire aux écosystèmes

1) Évolution de l'étude des stress multiples (chimique/biologique/physique), chronique (diffus), faibles doses : vers la notion d'éco-exposome.

L'exposition chronique d'organismes vivants à des mélanges de contaminants à faible dose semble devenir la norme plutôt que l'exception (Fig. 1). La nécessité de mieux comprendre et prédire les effets de l'exposition chronique à de faibles doses et les « effets cocktails » est un front de science transversal. Ces questions deviennent d'autant plus prégnantes dans le contexte des changements globaux, où s'ajoute le besoin d'intégrer les réponses du vivant soumis à des stressseurs multiples chimiques, biologiques et physiques (contaminants ou altéragènes). Comment améliorer le réalisme des conditions d'exposition (doses, durée et voies d'exposition, changements globaux, etc.) dans les expérimentations et améliorer la prédiction ? La prise en compte combinée de l'impact des stressseurs environnementaux, en interaction avec les contaminants, sur la diversité, l'activité, le métabolisme et les allocations d'énergie, et l'immunité des organismes doit prendre une place prépondérante dans les travaux futurs.

La notion d'exposome, initialement développée en santé humaine, est désormais vue comme un concept nécessaire à appréhender et transposer à la santé des écosystèmes. Pourtant, les

définitions posent encore question et les enjeux associés sont multiples tant du point de vue conceptuel que technique. Il appartiendra à la communauté SIC de s'approprier le paradigme d'"éco-exposome" et de réfléchir collectivement à sa définition et aux perspectives de recherche associées. Les spécificités de l'"éco-exposome" se référerait notamment aux échelles d'organisation biologique concernées (individu ou population), aux échelles temporelles (exposition ponctuelle ou chronique, multigénérationnelle, etc.) à intégrer et aux échelles spatiales (contaminations multi-compartiments et milieux d'interface, trans-écosystèmes : organismes migrants, ou avec des stades de vie dans différents milieux, etc.) impliquées. Caractériser l'"éco-exposome" soulève, en outre, de nombreuses questions opérationnelles et méthodologiques en raison de la grande diversité des altéragènes auxquels les organismes sont exposés et de la multiplicité des indicateurs biologiques. D'autant que ces multi-expositions impliquent des substances à des niveaux de traces et des contaminants dont la spéciation géochimique est extrêmement variable selon les conditions du milieu. Les développements techniques doivent donc s'orienter vers une caractérisation la plus exhaustive possible, préférentiellement systématique et non-ciblée.

2) Adaptation et évolution, transgénérationnel, impact sur l'écosystème - Évaluation de l'état de santé des écosystèmes - Bio-indicateurs/marqueurs

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

Les processus qui régissent la contamination des milieux, les transferts latéraux et horizontaux de contaminants, ainsi que les mécanismes qui déterminent le fonctionnement des populations et communautés opèrent à des étendues spatiales à l'échelle des paysages et des bassins versants (Fig. 1). Ces échelles « intermédiaires », caractérisées par leur mosaïque de milieux et leur connectivité, leurs continuités/discontinuités et zones d'interface, mériteraient plus d'attention pour comprendre et anticiper la dynamique des contaminations et de leurs impacts sur les écosystèmes, et envisager les écosystèmes sous leur angle de continuum et non pas comme des systèmes fermés (*Liens atelier 4*). Renforcer les approches systémiques à l'échelle du paysage et du bassin versant permettrait de pouvoir considérer le rôle des interactions entre le vivant et les flux de contaminants sous contraintes des changements globaux. L'étude des trajectoires des écosystèmes contaminés requiert la considération du socio-écosystème et des impacts associés aux activités humaines, non seulement sur l'émission de contaminants, mais aussi sur des modifications du paysage et de l'usage des sols/des ressources en eau à même de modifier l'écodynamique des polluants.

Quelles sont les conséquences aux « grandes » échelles des événements biologiques ayant lieu aux petites échelles (e.g. plasticité phénotypique, adaptation, déterminants génétiques) et inversement ? Nos efforts doivent se poursuivre sur la compréhension d'une part, des mécanismes d'action et leur intégration aux différentes échelles, et d'autre part, de la dynamique des interactions biotique-abiotique du niveau moléculaire aux flux à l'échelle écosystémique. Comment suivre les réponses des organismes vivants sur le long terme ? Une attention particulière doit être portée aux conséquences inter- et/ou trans- générationnelles de l'exposition aux contaminants et aux effets décalés ou indirects. Il conviendrait de favoriser les recherches pluridisciplinaires, où l'impact d'une pollution ne serait pas non plus uniquement regardé sur un groupe d'organismes, mais au contraire sur des réseaux trophiques entiers ou sur des holobiontes (ainsi que sur la société, c.f. section V).

Aux échelles des populations et des communautés, la compréhension des impacts des pollutions pourrait s'appuyer sur l'étude des « traits » et de leur combinaison, et des contraintes amenant à leur sélection, ou encore leurs conséquences sur les flux de matière, d'énergie et de contaminants. Quelles sont les limites à la résistance et à la résilience des écosystèmes et comment évoluer vers une application en outil de gestion ?

3) Spéciation, biodisponibilité, métabolisation, transfert dans les réseaux trophiques.

Les transferts entre compartiments abiotiques, entre compartiments abiotiques et biotiques, et au sein du compartiment biotique sont dirigés par des mécanismes relatifs à la spéciation, la (bio)disponibilité ou encore la métabolisation qui nécessitent des travaux des plus petites échelles (moléculaire et nanométriques) aux macro-échelles faisant appel à l'interdisciplinarité (Fig. 1).

Une attention grandissante est portée sur le rôle de la spéciation dans les transferts des contaminants dans les réseaux trophiques. Le rôle des microbiotes, des processus de métabolisation, et des changements de biodiversité dans la biodisponibilité, les transferts trophiques et l'écodynamique des contaminants restent peu étudiés et modélisés. Quantifier les sources de contaminants au sein des réseaux trophiques est également un enjeu à renforcer, de même que caractériser la propagation des effets indirects et en cascade des contaminants émergents, encore mal connus dans les réseaux trophiques.

Il est possible de tirer profit du métabolisme des micro-organismes ou des propriétés de certains végétaux et matériaux d'origine biologique pour développer des solutions de remédiation, par définition, fondées sur la nature, grâce à des partenariats avec des spécialistes de l'ingénierie des procédés et de l'ingénierie écologique. Il reste cependant à élucider le rôle des micro-organismes dans la dynamique de certains contaminants d'intérêt émergent, et s'attacher à différencier les processus biotiques et abiotiques menant à l'atténuation naturelle des contaminants.

Besoins :

Des besoins apparaissent concernant l'analyse des contaminants *in situ* pour l'évaluation de l'éco-exposome et la surveillance des écosystèmes, tels que la mise au point de capteurs et d'échantillonneurs passifs, d'outils low-cost déployables sur de nombreux sites, le développement d'analyses non ciblées, ou pour évaluer la spéciation des éléments, ou la détection de faibles doses. Le défi ici est de collecter des «empreintes physico-chimiques» représentatives du cortège moléculaire des composés et autres stressors présents dans les milieux, à comparer aux indicateurs biologiques de l'état de santé du milieu. Des plateformes analytiques mutualisées, spécialisées dans l'analyse des micropolluants, pourraient être au cœur de ces développements méthodologiques. Par ailleurs, nos recherches doivent encore plus tirer profit de l'analyse des traceurs isotopiques pour l'identification des sources et des voies de transformation des polluants. L'utilisation de la modélisation de la spéciation géochimique des contaminants doit à la fois se perfectionner et se démocratiser, pour une étude plus fine de leur comportement et devenir dans de nombreux contextes, et pour motiver le développement de nouvelles approches numériques.

Il semble aussi essentiel de poursuivre nos efforts d'observation en pérennisant ou en créant des dispositifs expérimentaux de terrain ou des stations expérimentales pour le suivi d'écosystèmes intégrés dans des réseaux nationaux/internationaux de type SNO. Ces observatoires doivent se développer : i) sur des territoires pollués en transition, en y incluant les aspects sociaux et sanitaires, ii) sur des milieux aux interfaces (zones ripariennes, bassins de drainage, interfaces nappe-rivière) ou des continuum terrestre-aquatique. Sur ces systèmes d'observation long terme, il faudrait pour être efficace, densifier les réseaux de capteurs à l'échelle du paysage, acquérir des données spatiales à haute fréquence (e.g. drone, satellite) et intégrer à la fois les volets physico-chimiques, écologiques et biologiques. Enfin, il faut améliorer l'accessibilité des données produites et des simulations de référence.

A l'avenir, il faut privilégier les approches couplant les observations, l'expérimentation et la modélisation tout en profitant des observations dans le passé qui permettent de tracer des scénarii pour le futur. Elles devraient à terme permettre d'aboutir au développement d'outils de diagnostic de l'impact écotoxicologique des contaminants sur le vivant.

Pour structurer notre communauté, il s'agirait d'une part de créer des réseaux thématiques, notamment un réseau autour de l'éco-exposome (définition, caractérisation) et d'autre part de pérenniser les réseaux déjà existants (écotoxicologie microbienne EcotoxicoMic). Promouvoir le dialogue entre modélisateurs, observateurs et expérimentateurs est toujours d'actualité. Pour élargir notre compréhension de l'impact des contaminants, nous devrions élargir les champs de compétence de la communauté SIC en y incluant par exemple les sciences de l'évolution.

III) Environnement et Santé, perspective "One Health"

Aujourd'hui le dérèglement climatique (sécheresse, évènements pluvieux extrêmes, crues inondations, raréfaction des ressources), et l'augmentation de la pression anthropique exercée sur les territoires (érosion de la biodiversité, multi-contaminations chimiques ou microbiologiques (accidentelles ou chroniques), s'accompagnent d'une augmentation des pathologies chroniques et/ou de l'émergence ou réémergence d'agents vecteurs de maladies infectieuses (Fig. 1). La notion d'exposome, qui considère les différentes voies d'exposition (respiratoire, alimentaire, inhalation, contact direct) de l'Homme aux contaminants chimiques et biologiques, en distinguant les phases clés tout au long de la vie, à laquelle s'ajoute la notion d'une seule santé ("One Health"), positionne l'expertise de l'INSU SIC comme un acteur incontournable pour évaluer les interactions entre l'environnement (dont la faune sauvage), appelée ici "éco-exposome", et la Santé Humaine. La problématique « Santé – Environnement » doit être appréhendée à l'échelle de la Zone Critique, en couplant les démarches d'observation, de quantification, d'expérimentation et de modélisation pluri-échelles, et en développant des instrumentations innovantes.

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

Répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain et ultra-marin, ces observatoires sont propices à la création d'un « Observatoire Santé Environnement distribué » dans lequel ces proxys Santé seraient suivis en parallèle des paramètres abiotiques d'ores et déjà suivis sur le long-terme. Il serait alors possible d'étudier la dynamique spatiale et temporelle de ces marqueurs sur des sites aux caractéristiques contrastées en termes hydro-climatiques ou d'occupation des sols (démographie humaine et animale, activité industrielle, urbaine et agricole, changements paysagers). Il est ainsi envisageable d'appréhender l'impact du changement climatique, de la transition énergétique, des évènements extrêmes, et à terme de modéliser et/ou construire des scénarios prédictifs au service de l'épidémiologie prédictive, voire de définir des systèmes d'alerte : avec l'identification de périodes ou de sites où le risque d'exposition environnementale (contaminants chimiques, microbiologiques, et gènes d'intérêt correspondants) serait plus élevé.

En complément à cette approche d'observation, une meilleure connaissance des niveaux d'imprégnation du biote (à différents niveaux du réseau trophique), et des populations humaines (collaboration avec les acteurs en santé publique) par les contaminants émergents (composés organiques émergents, éléments métalliques critiques et contaminants biologiques) est une donnée essentielle pour le suivi de ces expositions. Une collaboration avec les acteurs de la santé publique (suivi de cohorte, accès aux données épidémiologiques) permettrait d'établir des liens solides entre cette exposition et l'apparition de maladies ou de problèmes de santé spécifiques.

Besoins :

- de coordination à l'échelle nationale pour éviter des "doublons" et favoriser les études complémentaires qui s'appuient sur l'expertise des laboratoires, sur des plateformes analytiques, et sur des sites dédiés à l'observation ;
- associer les acteurs du monde de la santé (e.g. des acteurs médicaux aux associations de malades) et notamment les toxicologues et épidémiologistes à l'échelle des "territoires d'observation".

Verrous /Défis:

- bien identifier et faire connaître l'expertise du domaine SIC de l'INSU pour appréhender la dynamique des contaminants microbiologiques et chimiques dans l'environnement.

IV) Enjeux données et modèles**1) Observation (liens avec atelier 3 « Observons nos observatoires »).**

Les recherches fondamentales s'intéressent à la dynamique et à la spéciation des contaminants, dans les différents compartiments de la Zone Critique, à des fins de modélisation de leur (bio)disponibilité, en intégrant les interactions avec les organismes vivants et les phases porteuses de contaminants (Fig. 1). Les observatoires INSU et INEE, ainsi que les LMI au Sud, offrent une variété de conditions climatiques, de niveaux et contextes d'anthropisation, permettant de développer des recherches interdisciplinaires sur les contaminants et leurs impacts environnementaux et sanitaires à différentes échelles de temps et d'espace. Ces observatoires pourraient être développés (stations expérimentales, développement instrumental à bas coût pour la mesure *in situ* haute fréquence de contaminants, suivi de cohortes...) et mieux exploités afin de répondre à des besoins d'observation dans différents domaines : écotoxicologie, santé-environnement, développement de capteurs *in situ* haute fréquence connectés, notamment pour le suivi d'évènements extrêmes... Fort de ces expertises, il conviendra de réfléchir activement au choix de proxies pertinents de contaminations ou de pollutions (e.g. contaminants chimiques aux caractéristiques écodynamiques différentes, contaminants biologiques, ADNe), et/ou à des paramètres abiotiques intérateurs de ces contaminations chimiques, et susceptibles d'être suivis à haute fréquence. D'importants verrous analytiques et méthodologiques subsistent pour analyser les contaminants à haute fréquence, notamment en lien avec le degré de sophistication des instruments de labo, peu ou pas compatibles avec les contraintes du terrain, ou l'échantillonnage (protocoles, stratégie, représentativité, conservation). Ces difficultés revêtent une importance particulière lorsqu'il s'agit de la spéciation ou de la détermination des sous-produits de dégradation. Des innovations potentielles pourraient émerger du développement de capteurs peu coûteux ou d'un "réseau de capteurs hétérogènes" (en lien avec INSIS, Terra Forma, atelier 9 "Responsabilité environnementale"), d'échantillonneurs passifs, de biocapteurs, de bioindicateurs de pollution, ou de RiverLabs, par exemple. Les défis techniques liés à l'adaptation sur le terrain demeurent fondamentaux, les capteurs chimiques de très haute qualité développés en laboratoire étant confrontés, *in situ*, à des problèmes d'interférence et de biofouling, par exemple.

Besoins :

- AAP instrumentation pour « sortir les méthodes et instruments des laboratoires » ;
- Plateforme nationale mécanique/électronique/électrotechnique/informatique pour élaborer de nouveaux outils ;

- Reconsidérer le maillage territorial, en particulier les disparités régionales en termes d'équipements et de moyens ou concentrer nos ressources sur un observatoire particulièrement bien équipé et pluridisciplinaire ;
- Intensifier les échanges avec diverses communautés de modélisateurs afin d'ajuster et de préciser les protocoles, ainsi que de déterminer les analyses les plus pertinentes et utiles (par exemple, la filtration à 0,2 μm ne permet pas de doser le dissous mais, bien souvent, une suspension colloïdale) ;
- Besoin RH en suivi et traitement de données issues des observatoires ;
- Besoin RH pour aider à la mise en œuvre des approches de sciences participatives sur les observatoires ;
- Assurer une continuité spatiale de la modélisation incluant la connectivité latérale et une approche bijective des continuums (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) Expérimentation et analyse.

Des progrès dans l'analyse du comportement et du devenir des contaminants, et de leurs phases porteuses (ex: particules, colloïdes), dans des systèmes biogéochimiques de l'échelle atomique/moléculaire jusqu'au mètre sont en cours via le développement de nouvelles méthodologies, dispositifs expérimentaux et couplages alliant spectroscopie (ex: EXAFS bulk), spectrométrie, imagerie (ex : spectro-microscopie synchrotron, Nano-SIMS, nano-FTIR, STEM, (nano)tomographie X, dispositifs micro- et milli-fluidique, micro- et mésocosmes, etc...), entre autres. Bien que ces technologies ne soient pas toutes récentes, les méthodes et les instruments qui y sont associés sont en constante évolution. Les enjeux résident dans l'évolution permanente des techniques, les innovations dans le couplage des méthodes, et surtout dans l'ouverture à la communauté, permettant l'application de ces méthodes à des questions nouvelles, des disciplines particulières, ainsi qu'à différentes matrices. Le développement du couplage de ces méthodes avec les approches isotopiques et les datations permettrait dans certains cas de replacer les processus moléculaires dans les évolutions à long-terme des systèmes, ce qui est encore peu mis en œuvre. Il est également nécessaire de développer de nouvelles approches expérimentales couplant des expériences *in situ* (sur le terrain), en mésocosmes, des systèmes simplifiés à l'extrême au laboratoire, et de la modélisation numérique (*liens avec ReGEF*), co-construites entre différents experts multi- et interdisciplinaires. Des outils statistiques pour le design des expériences de façon à optimiser le travail en laboratoire, ainsi que des procédures pour faire le saut d'échelle (de l'échelle moléculaire à l'échelle macroscopique) pourraient être développés. Ce dernier point implique un rapprochement avec les communautés scientifiques qui travaillent sur les procédures d'homogénéisation.

De nouvelles idées d'instrumentations et de modélisation pourraient être inspirées de ce qui est fait dans les autres communautés, et appliquées/adaptées aux SIC, par exemple :

- De nouvelles techniques synchrotron (HERFD-XANES, XRS, RIXS, Aspects dynamiques des réactions avec le X-FEL nano-picoseconde), pour sonder la spéciation ou les dynamiques réactionnelles ;
- Il existe un besoin important de mettre en œuvre des outils de modélisation numérique aux échelles moléculaires et nanométriques afin de comprendre le fonctionnement des interfaces solide-solution-contaminants. Cela englobe des techniques telles que la DFT (Théorie de la

Fonctionnelle de la Densité), la dynamique moléculaire, la chimie quantique, et l'électrocinétique.

- Nouvelles approches d'analyses non-ciblées des contaminants (non-target screening, i.e., Orbitrap) et analyses isotopiques, de composés-spécifiques et de marquage isotopique pour l'étude des sources, de la spéciation et de la transformation des contaminants dans les compartiments environnementaux.
- Nouvelles méthodologies et traitement de données pour optimiser l'utilisation des outils existants (*liens avec l'atelier 9 « Responsabilité environnementale »*) (ex: spectroscopies UV-vis, infrarouge, XAS au synchrotron, approches chimiométriques).
- Certaines techniques, "classiques" pour d'autres domaines, sont largement sous-exploitées en SIC (ex : RMN, diffusion de neutrons, raman).

L'INSU est globalement doté d'un puissant parc analytique, en structuration notamment via ReGEF. D'importants verrous existent non seulement sur les développements analytiques, mais également sur la préparation d'échantillons variés (eaux, sols, minéraux, biologiques ; homo/hétérogènes). Cela limite les prestations d'analyse et l'ouverture à la communauté des nouveaux développements analytiques (*liens avec ReGEF*). Autre exemple en lien avec la problématique "échantillon", au synchrotron, des équipements pour garantir l'intégrité des échantillons naturels sensibles (notamment sous le faisceau des synchrotrons de nouvelle génération) sont nécessaires afin de pouvoir profiter de ces techniques dans différents contextes pertinents pour les SIC.

Besoins :

- pour économiser du temps de faisceau synchrotron, aller vers des runs partagés, une banque ouverte de spectres de références avec leurs métadonnées

3) Modélisation

Un des défis majeurs sera de développer une modélisation intégrée multidisciplinaire, pour l'évaluation des risques environnementaux et de la vulnérabilité des socio-écosystèmes (Fig. 1), à différentes échelles : de la molécule (ou du gène) à l'individu et la population, dans les différents compartiments de la zone critique (y compris les interfaces), à différentes échelles de temps et d'espace. Une des forces de la modélisation est de pouvoir aborder toutes les échelles spatio-temporelles (lien avec atelier 8 « Intégration des différentes échelles d'espace et de temps dans la Zone Critique »).

Cependant, d'importants verrous aux interfaces entre les échelles subsistent. Par exemple, (1) La modélisation moléculaire doit évoluer vers une augmentation de la complexité des systèmes modélisés (complexité chimique, interfaces solide-liquide, systèmes désordonnés) (rôle des modélisations à mésoéchelle, dynamique Brownienne, Boltzmann sur réseau...), (2) les modèles de transfert à l'échelle du pore vers le bassin versant, (3) les modèles écotoxicologiques vers le réseau trophique et la santé des écosystèmes.

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

Il est également nécessaire de réfléchir au développement de nouveaux outils de modélisation du transport réactif des contaminants, incluant la spéciation des contaminants et la formation

(cinétiquement limitée) de produits de dégradation, la spéciation redox des éléments traces métalliques, ou du lien entre spéciation- biodisponibilité-toxicité (« biotic ligand model » amélioré) en renforçant des collaborations efficaces multi- et inter-disciplinaires, avec les observatoires (données pour tester et valider), les expérimentateurs (données pour calibrer et tester), les mathématiciens (développer les modèles numériques) et informaticiens (développement des logiciels). Ces modèles pourraient être basés sur des approches mécanistiques, statistiques (notamment big data et IA) ou leur combinaison.

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

Besoins :

- Structurer les communautés de modélisateurs en lien avec les contaminants (spéciation géochimique, écotoxicité, transport réactif), par exemple via la création d'un (ou plusieurs) groupement(s) de recherche afin de catalyser ces développements de modèles
- Création d'une plateforme en modélisation (avec personnel technique dédié) pour accompagner les projets des équipes focalisées sur l'observation et l'expérimentation et, ainsi, mieux intégrer des activités de modélisation dès la conception des projets (et non comme un WP final)

V) Contaminants, pollutions et SHS

Il est crucial de renforcer l'intégration des sciences humaines et sociales (SHS) dans la compréhension ontologique, axiologique et praxéologique des choix de sociétés et de l'évolution du droit de l'environnement et des réglementations vis-à-vis de la formulation de nouvelles substances, de leur mise sur le marché et de leur cycle de vie, et la résolution des conséquences environnementales liées aux pollutions ponctuelles et diffuses, en lien avec la réhabilitation, les préjudices et la justice sociale et environnementale. Une co-construction plus systématique de projets SIC sur les pollutions avec les SHS permettrait d'intégrer des aspects essentiels :

Réflexivité : Élaboration d'un cadre interdisciplinaire réflexif pour l'étude des contaminations et des concepts liés aux pollutions, tels que l'émergence, l'impact, la remédiation, le préjudice humain et non-humain.

Compréhension des valeurs, des jeux d'acteurs et du comportement humain : Besoin de mieux comprendre les principes et les fondements sociaux, politiques, culturels et économiques sous-tendant l'élaboration, la production, la distribution, la diffusion et l'utilisation de substances polluantes.

Contexte culturel ou régional : Prendre en compte les différences sociales, économiques et culturelles, ainsi que les contextes (écologique, juridique, gouvernance) locaux dans la compréhension du problème et dans la conception de mesures de gestion environnementale. En particulier l'intégration du vivant non-humain dans les prises de décision, le droit et les modes de gouvernances des contaminations environnementales constituent des verrous.

Participation citoyenne : favoriser l'intégration des savoirs non académiques et des citoyens dans l'élaboration et le suivi de recherches autour d'un enjeu de contamination (sciences participatives). Il s'agit en particulier d'analyser le lien et les temporalités entre les observations, l'analyse des conséquences, l'alerte, les décisions, la gestion et la gouvernance, pour définir des schémas participatifs de gestion des problématiques environnementales.

Acceptabilité sociale : Prendre en compte les perceptions, les valeurs et les préoccupations de la population.

Éducation et sensibilisation : besoin de développer des programmes éducatifs de prévention et sensibilisation adaptés aux besoins spécifiques de chaque pollution et de chaque population.

Ces aspects ont été identifiés mais bien d'autres seraient pertinents et devront être abordés : en économie de l'environnement, en géographie sociale, etc.

En termes de transdisciplinarité, il s'agit de repenser la **façon d'interagir** et de co-construire des projets de recherche avec les SHS, mettant en jeu des liens avec des dynamiques citoyennes et les acteurs socio-économiques, notamment en favorisant l'émergence de questions de recherche communes et en mettant en œuvre des structures et des communautés épistémiques autour d'enjeux sociétaux communs sur les contaminants (*liens Atelier 5*).

3/ Aspects transverses :

Nouveaux métiers :

RH interface avec les pouvoirs publics et mise en œuvre sciences participatives,

RH :

- RH chimie analytique / IR chimie analytique,
- RH pour l'automatisation de l'acquisition de données (électronique, électrotechnique, mécanique, programmation logicielle, etc...),
- RH pour le numérique, les sciences de la donnée, le traitement de données : mathématiciens, informaticiens, programmeurs, IA, big data, bases de données,
- RH sur l'exploitation de données issus des observatoires,
- RH bio-informaticiens : traitement de données (méta)-omiques,
- RH pour la conduite et la pérennisation de suivis long-terme (e.g. Observatoires, ZA, living labs),
- Moyens dédiés pour les zones d'études difficiles d'accès (recherches au Sud, hautes altitudes/latitudes, milieux souterrains, etc.).
- AAP pour projet à risques

Formations (continue) :

- Quel est notre impact environnemental (en termes de quantité de contaminants au laboratoire)? Comment le limiter ? (ex : jeter ou réutiliser les tubes plastiques),
- Co-construction de projets (ex: avec les SHS), animation,
- Découverte des outils de modélisation et, surtout, (1) ce qu'ils peuvent apporter dans les projets et (2) comment les intégrer au mieux dans les projets (par ex. : en connaissant leurs limites).

4/ Éléments éventuels pour alimenter le bilan des dernières prospectives :

Temporalité des processus : des avancées ont été réalisées pour une meilleure prise en compte de la temporalité des processus réactionnels et des transferts vers le vivant, la représentation des

trajectoires fonctionnelles des écosystèmes face à des contaminations anciennes, mais la modélisation des mécanismes cinétiques à l'échelle moléculaire reste un enjeu, de même que l'évaluation des effets inter et/ou transgénérationnels de l'exposition aux contaminants.

Transferts entre compartiments : l'utilisation d'archives environnementales a permis de mieux contraindre les transferts entre les différents compartiments de la Zone Critique et d'améliorer la modélisation à grande échelle des flux de contaminants mais certaines zones critiques frontalières (glaciers tempérés et tropicaux, zones humides de haute altitude, certaines îles, ...), menacées par des changements rapides, méritent une attention particulière.

Risques associés aux émergents et Multi-stress : l'identification et la quantification des polluants émergents et de leurs effets sur le vivant à faibles doses ont connu des avancées majeures, notamment via le développement de l'analyse non ciblée et d'indicateurs d'impacts globaux via les approches omiques, l'utilisation de mésocosmes. La communauté SIC s'est saisie de la question des drivers environnementaux de l'antibiorésistance. Mais la modélisation du comportement des polluants émergents dans l'environnement et de leurs effets sur l'écosystème et la santé humaine demeurent des enjeux majeurs, en particulier dans le cas des « cocktails » et des effets à long terme.

Liste d'éléments factuels de structuration de la communauté au cours des dernières années (à compléter lors du colloque) :

- La communauté s'est appropriée les outils moléculaires ⇒ nouveaux besoins, par exemple en traitement de data ;
- Expérimentation mésocosme/bioréacteur : réseau RéGEF ;
- GDR Polymer et Océan : structuration plastiques aquatiques / en extension vers le continental
- Réseau Ecotoxicomic

Prospective SIC 2023

Document de synthèse préliminaire des ateliers

Titre de l'atelier	Intégration des différentes échelles d'espace et de temps dans l'étude de la zone critique
Nom(s), prénom(s), Adresse(s) mail des coordinateur.trice.s	Anne Alexandre (alexandre@cerege.fr), Julien Bouchez (bouchez@ipgp.fr)
Membres du groupe d'animation de l'atelier	Pierre Amato, Etienne Balan, Jérôme Gaillardet, Pierre Barré, Cécile Gautheron, Christine Delire, Cornelia Rumpel
Date/version du document	22/01/2024

1/ Mode de fonctionnement de l'atelier :

Début Novembre : Les coordinateurs ont élaboré la première version d'un tableau verrous/objectifs/actions compilant les contributions de la communauté SIC remontées durant l'été 2023. Les éléments mentionnés dans les prospectives précédentes sur le sujet (Prospectives SIC 2017, Livre Blanc Paléo, OZCAR 2.0, OZCAR-RZA...), et paraissant toujours d'actualité, ont aussi été pris en compte. Sur la base des remontées de la communautés, quatre *questions/verrous* ont été identifiés. Pour proposer des pistes permettant de répondre à ces questions, ont été listés des *objectifs* qui concernent objets d'étude, observations, ou modélisation et des *actions* précises s'orientant vers ces objectifs

20/11/2023 : Le tableau est partagé avec tous les membres du groupe d'animation pour qu'il soit complété/modifié.

05/12/2023 : Le tableau modifié par le groupe a été re-organisé et re-synthétisé par les coordinateurs.

11/12/2023 : Le nouveau tableau est envoyé à la CS SIC et aux membres du groupe d'animation.

15/12/2023 : Le tableau est partagé avec toute la communauté SIC, avec un fichier où pourra être noté tout commentaire.

06/02/2024 : Les 4 questions/verrous seront discutés en détail lors du colloque de prospective : il sera tenté de préciser, compléter et hiérarchiser les actions proposées.

Des recouvrements existent avec tous les autres ateliers, mais en particulier avec les ateliers 2 (« Outils/données/connaissances »), 3 (« Observons nos observatoires »), et 4 (« Interfaces et continuums dans les SIC »).

2/ Contribution scientifique :

Comment appréhender les différentes échelles de temps dans l'étude des SIC?

Objectifs

- Prendre en compte l'évolution passée des SIC pour comprendre leur fonctionnement actuel (interaction avec le climat, ressource en eau, aménagement...etc)
- Impact des transitions climatiques et des événements extrêmes passés (crues,sécheresses, événements hydro-météo-marins de forte énergie)
- Prendre en compte les processus évolutifs dits "courts" (ex.: bactéries)

Actions

- Cibler (acquisition de données, modélisation) des périodes-clé quaternaire et au delà (Holocène, transitions glaciaires-interglaciaires, Paléocène-Eocène (ex. : « Thermal Maxima »))
- Développer les rétro-observatoires avec une instrumentation adaptée pour enregistrer les événements extrêmes actuels (déploiement de mesures haute-fréquence)
- Affiner les méthodes de datations des profils d'altération (minéraux secondaires): datations (U-Th)/He, déséquilibre U/Th, OSL et ^{14}C *in situ*
- Identifier de nouveaux marqueurs de l'Anthropocène
- Développer les clés d'interprétation de l'ADN environnemental
- Renforcer les interactions des communautés SIC et Paléo

Comment appréhender les différentes échelles spatiales dans l'étude des SIC?

Objectifs

- Mieux contraindre les mécanismes moléculaires de croissance et d'altération des minéraux basse température (nucléation, croissance cristalline, dissolution, réprécipitation)
- Quantifier le rôle du compartiment colloïdal sur les flux à grande échelle (sol-végétation-atmosphère; bassins versants)
- Prendre en compte la diversité microbienne et virale et les mécanismes cellulaires à l'échelle des écosystèmes
- Renseigner les interactions entre variabilité environnementale et dynamique des populations (distribution, acclimatation, évolution)
- Comprendre le rôle des processus de stabilisation du carbone organique à micro-échelle pour les cycles géochimiques globaux
- Passer des mécanismes à l'équilibre aux mécanismes cinétiques et chemins réactionnels

Actions

- Changer d'échelle par le biais de campagnes spécifiques, permettant de documenter le bilan de masse sur de grandes distances (ex: raids en terre polaire, transects latitudinaux)
- Développer des réseaux d'observations coordonnés (maillage spatial de variables d'intérêt pour interpolations et extrapolations spatiales)
- Développer des approches simples pour caractériser la diversité fonctionnelle basée sur les traits
- Développer l'utilisation des méthodes spectroscopiques et d'imagerie (STXM, MET, nanoSIMS) pour mieux contraindre les mécanismes à l'échelle moléculaire
- Intégrer les nouvelles techniques en modélisation moléculaire: intelligence augmentée, machine learning, construction de potentiels interatomiques, échantillonnage accéléré, prédiction de propriétés; avancées récentes en matière de théorie de la nucléation cristalline :voies non classiques, clusters de prénucléation)
- Obtenir des temps de simulation plus longs en modélisation moléculaire tout en conservant un niveau de théorie élevé comme l'accélération de dynamique moléculaire *ab initio* grâce au machine learning, ou les approches semi-empiriques réactives à moindre coût computationnel (DFT tight-binding, champs de force réactifs)

Comment prendre en compte la complexité (hétérogénéité, temporalités) des SIC dans les modèles ?

Objectifs

- Investiguer les rétroactions climat-végétation dans les ESMs
- Investiguer le compartiment alluvial dans les systèmes d'observations et les modèles
- Relier organisation spatiale des paysage et des sols au devenir des MO et à séquestration du C
- Reconstituer les trajectoires et calculer les temps de réponses des écosystèmes sous pressions climatiques et anthropiques.
- Mieux renseigner la connectivité entre différents régions du monde (dont celles qui sont peu étudiées, i.e. cryosphère, hautes latitudes, zone intertropicale)

Actions

- Discriminer dynamique linéaires vs. non-linéaires, points de bascule, processus quantifiables
- Généraliser les analyses de sensibilité
- Explorer des solutions possibles au calage d'un modèle (*deep learning*, optimisation dans un cadre statistique)
- Évaluer et réduire l'incertitude sur les paramètres et l'incertitude sur les prédictions fournies par les modèles (« *data worth analysis* »)
- Exploiter les big data temporelles requises pour étudier les héritages, et la résilience voire les points de bascule de certains compartiments
- Développer la modélisation de la zone critique couplant transport-réactif et processus érosifs
- Intégrer les dynamiques sociales dans l'analyse des évolutions futures (cf Zones Ateliers)
- Intégrer des données dérivées d'imagerie satellitaires à haute résolution spatiale
- Définir les paramètres à cibler pour les approches et comparaisons modèles-données
- Améliorer la couverture géographique renseignée par les données (zones intertropicales et polaires)

3/ Aspects transverses :

- Développer des sources de financement réellement ouvertes aux recherches transdisciplinaires (ANR)
- Observatoires: 1) développer les rétro-observatoires; 2) renforcer la collaboration avec les OHM *via* des appel d'offres incitatifs
- Créer un outil de gouvernance intégrée sur le continuum Homme-Terre-Mer
- Renforcer le soutien logistique aux sites d'étude peu couverts à moyen et long terme (observatoire zones intertropicale et polaire)
- Modèles: promouvoir le dialogue entre modélisateurs, mais aussi entre modélisateurs « SIC » et modélisateurs en physique, chimie, biologie
- Développer les espaces d'échanges entre communautés modèles / données (école d'été ? cf prospectives SIC 2018-22)
- Gestion des données: mise en place d'une coordination nationale permettant de fluidifier les échanges de données entre les organismes (CNRS, IRD, CIRAD, INRAe), les laboratoires, les IR (i.e. REGEF) et l'interopérabilité de ces données (état des lieux sur THEIA, Gaia Data, Data Terra...) + politique de stockage et de mise à disposition
- Gestion des échantillons: simplifier les connexions entre les banques internationales d'enregistrement des échantillons géologiques et la cyber-carothèque nationale
- RH/Métier : Développer des compétences autour des big data et de l'IA; Être attractif pour les étudiants d'autres disciplines.

4/ Éléments éventuels pour alimenter le bilan des dernières prospectives :

Les objectifs listés ont souvent déjà été évoqués dans les dernières prospectives. Dans ces prospectives, nous proposons d'identifier des actions permettant de les atteindre.

Prospective SIC 2023

Document de synthèse préliminaire des ateliers

Titre de l'atelier	Responsabilité environnementale
Nom(s), prénom(s), Adresse(s) mail des coordinateur.trice.s	Cécile Albert - cecile.albert@imbe.fr Mathieu Chassé - mathieu.chasse@sorbonne-universite.fr Françoise Immel - francoise.immel@univ-fcomte.fr Laurent Jeanneau - laurent.jeanneau@univ-rennes.fr Sylvain Kuppel - sylvain.kuppel@ird.fr
Membres du groupe d'animation de l'atelier	Nicolas Champollion, Émilie Dassié, Maxime Debret, Simon Gascoin, Laure Guerit, Basile Hector, Emilie Jardé, Jean Kempf, Valérie Le Dantec, Odin Marc, Sylvie Massemin, Arnaud Mialon, Anne Mone, Benjamin Musnier, Jeremy Panthou, Thierry Pellarin, Christophe Peugeot, Irene Schimmelpfennig, Tiphaine Tallec
Date/version du document	31.01.2024

1/ Mode de fonctionnement de l'atelier :

Décrire de façon synthétique le mode de fonctionnement (par ex : nb de personnes, nb de réunions, support de travail, mode de prise en compte des contributions, échanges avec la communauté) de votre atelier.

Cet atelier a été initié à partir de deux propositions. La première, et la plus structurée, provient d'un appel à bonnes volontés au sein des référents enjeux environnementaux dans les différents laboratoires du périmètre des SIC. Un groupe de travail a ainsi été constitué avec une vingtaine de personnes volontaires en vue de proposer un premier document synthétique soumis pour les prospectives SIC. La seconde proposition, portée par 3 personnes, dérivait d'un récent rapport de synthèse d'un atelier participatif sur la réflexivité dans la communauté modélisation SIC.

L'atelier 9 né de ces deux propositions s'est enrichi en élargissant au maximum la participation et les idées de la communauté SIC à travers la création d'un tableau collaboratif (<https://app.klaxoon.com>) et d'un appel à contribution. Un travail parallèle a consisté à synthétiser les documents issus de prospectives ou réflexions antérieures effectués dans différents domaines ou par différentes instances reliées à l'ESR (comité d'éthique du CNRS, prospectives de l'INP, du CNES). Les idées ainsi regroupées ont servi de base à la construction de l'actuel document. Elles ont été analysées, enrichies, organisées, synthétisées puis retranscrites au fil de l'eau au sein d'un document partagé. Le déroulé des différentes étapes de cet atelier 9, a été échelonné au travers de cinq réunions menées en visioconférence entre mi-octobre et mi-décembre 2023.

2/ Contribution scientifique :

Présenter la synthèse du travail préliminaire en atelier (nb de pages ~2-3 - non finalisée) :

Cet atelier vise à cerner les contours et modalités des activités de recherche futures en SIC au regard des crises environnementales en cours qui questionnent les relations science-société ancrées dans les pratiques de la communauté SIC. Il s'agit de maintenir une activité pertinente, tant du point de vue de sa solidité scientifique que des thématiques de recherche, tout en préservant le sens des recherches pour les actrices et acteurs de la communauté, en tenant compte de l'empreinte environnementale

des travaux, de leurs implications et pertinence sociales dans une société bousculée par ces changements.

(i) **Grands thèmes (de façon la plus intégrative possible au regard des contributions reçues),**

De par les objets qu'elle étudie, la communauté SIC se considère et est traditionnellement perçue comme au cœur des enjeux environnementaux, qui s'agrègent, de façon systémique et transdisciplinaire dans la notion d'habitabilité de la planète. La communauté SIC semble bien outillée pour contribuer, en interactions avec d'autres disciplines, aux diagnostics de pertes d'habitabilité de la planète (notamment aux échelles locales via les observatoires), et identifier des leviers pour transformer voire « réparer » les habitats, au sens large. Cependant, il est rarement dans la culture scientifique de celles et ceux qui composent cette communauté de questionner les finalités, le sens ou les valeurs qui sous-tendent les travaux de recherche menés sur les SIC. De manière plus provocante, la communauté SIC pourrait se demander si elle est une clé ou un verrou face aux crises environnementales actuelles ; d'un point de vue social, si elle sert des structures d'émancipation ou perpétue des logiques de domination. Au contraire, l'enjeu contemporain pour la communauté SIC est de savoir comment répondre sans dogmatisme, mais dans une articulation clarifiée avec la société, aux questions du monde, toujours plus saillantes et dont la multiplicité des échelles dépasse nos forces. Il s'agit de trouver une juste proportionnalité entre les différents impacts de nos activités : d'un côté les impacts négatifs sur l'environnement au sens large (n'incluant pas seulement les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi l'impact sur la biodiversité, l'eutrophisation des milieux, les pollutions diverses, les structures géopolitiques de domination, ...), de l'autre les impacts positifs, tant d'un point de vue de la connaissance scientifique (savoirs nouveaux, développements techniques, doctorant-e-s formé-e-s, citoyen-ne-s éclairé-e-s, ...) que des retombées favorisant la préservation des écosystèmes et l'émergence de sociétés justes et équitables.

Responsabilité des SIC vis-à-vis de la société : transparence et exemplarité

Une mesure de l'impact environnemental de nos activités est nécessaire pour la transparence vis-à-vis de la société civile, des étudiant-e-s intéressé-es par la recherche, et de ceux qui nous financent. Ne serait-ce que parce que l'exemplarité est nécessaire pour être crédible sur des sujets remettant en question nos modes de vie (p. ex., Attari *et al.*, 2016, 2019), nous devons connaître notre empreinte sur l'environnement. Cette étape est aussi nécessaire pour estimer la proportionnalité entre les impacts positifs et négatifs mentionnés ci-avant. Finalement, ces indicateurs serviront de base pour prioriser au mieux les mesures nécessaires à la limitation de l'impact négatif de nos activités, et le suivi de mesures d'évitement ou d'atténuation, tout en répondant aux recommandations du COMETS.

Évolution nécessaire des métiers des SIC : atténuation et adaptation

Les évolutions des métiers ne pourront plus être ignorées à mesure que les changements globaux gagneront du terrain. Ils viendront du politique, de la société, des tutelles, et aussi des personnels de recherche. Il est donc nécessaire de préparer ces changements en amont afin de pouvoir continuer à exercer nos métiers sereinement et de limiter les tensions qui émergeront très probablement. En effet, ces évolutions percutent les arguments traditionnels de l'inaction climatique (Lamb *et al.*, 2020) qui non seulement se retrouvent dans nos communautés, mais où s'ajoutent des arguments propres à la recherche scientifique : obsession de la mesure, peur de la bureaucratisation, neutralité, et science sacrée (Carbou et Sébastien, 2023).

Conserver le sens de nos métiers et limiter la dissonance : impact des objets et questions de recherche sur la société

La responsabilité environnementale ne concerne pas seulement les modalités de la recherche mais aussi ses objets et questions scientifiques. La recherche sur les SICs hérite en partie de la fallacieuse injonction à la neutralité qui traverse les sciences. S'en défaire, en mettant en place des démarches réflexives pour questionner nos trajectoires de recherche, relève de la déontologie mais n'est pas sans risque de révéler dissonances et pertes de sens. Des ajustements, voire des transformations des activités de recherche sont donc probablement nécessaires afin d'ajuster les activités de recherche et leur impact sur les problèmes que les chercheur-euse-s diagnostiquent ou auxquels ils et elles tentent d'apporter des réponses en SIC. Dans cette démarche, il sera essentiel d'intégrer le fait qu'il n'y a pas de sciences ni de savoirs "neutres" (au sens d'être dépourvu-es de valeurs ; COMETS, 2023). Ce constat, consensus issu des sciences sociales et de la philosophie des sciences, doit permettre d'aller plus loin dans une démarche scientifique en prise avec les enjeux sus-mentionnés.

(ii) **Pistes de réflexions, incluant les axes de recherche et les innovations méthodologiques à développer,**

Utiliser et développer les outils de suivi de l'empreinte environnementale

L'empreinte carbone des laboratoires SIC commence à être connue grâce aux travaux de Labos 1point5, révélant la contribution importante des missions, des achats de consommables et de matériels (Mariette et al., 2022), permettant ainsi de dessiner des axes de travail. Ces constats sont rendus possibles par des outils tels que GES 1point5 ou des recueils de bonnes pratiques en écoconception informatique (Bonamy et al., 2022). Ces outils devraient être adaptés et popularisés auprès des porteurs de projets, afin de rendre routinier le calcul de l'impact d'un projet. Élargissant ce spectre d'évaluation « opérationnelle », il est urgent d'évaluer les différents types d'empreintes environnementales de nos activités, au delà des gaz à effet de serre, pour déterminer les meilleures stratégies d'atténuation. Dans cette optique, l'utilisation de méthodologies comme l'analyse de cycle de vie (ACV) pour des « systèmes » tels que les projets, les observatoires ou les infrastructures reste à développer. Cette évaluation est indispensable pour estimer le rapport entre impact et retombées des activités. Ce type d'approche est en cours pour des instituts utilisant massivement la télédétection (Marc et al., 2023), prenant exemple sur d'autres communautés : météorologie (Stevens et al., 2021), astrophysique (Aujoux et al., 2021, Knödlseher, et al., 2022) ou physique des particules (Bloom et al., 2022). Ce genre d'approche permettrait aussi d'établir s'il existe une typologie d'empreinte environnementale en fonction des cœurs de métier des SIC, permettant de proposer des actions ciblées de réduction d'empreinte. L'échelle d'application de ces suivis et mesure d'atténuation pourrait s'adapter selon l'objet : l'utilisation de quota (carbone ou distance) pour limiter l'empreinte carbone des déplacements peut se faire à l'échelle d'une équipe ou UMR (Ben Ari et al., 2023), la coordination des groupements ou la limitation des achats serait probablement plus pertinente à l'échelle de thématiques ou d'infrastructure de recherche.

Développer des designs expérimentaux durables et sobres

Une forme de fuite en avant du travail de recherche consiste à multiplier les projets sans avoir le temps de traiter ou valoriser l'ensemble des résultats obtenus. La quantité de données ouvertes est aussi en constante augmentation, ce qui laisse imaginer des perspectives de recherche à partir d'analyses et d'observations existantes. Lorsque l'acquisition ou la production de nouveaux résultats sont nécessaires, la conception des protocoles doit respecter une proportionnalité entre la précision du résultat recherché et les impacts environnementaux inhérents afin de les réduire, voire de les éviter. Le partage systématique de ces initiatives, via des communications, doit être valorisé pour permettre un essaimage dans la communauté. Le recours à la plateforme Transition 1point5 pour partager ses expériences et les bonnes pratiques mises en place dans les laboratoires devrait se généraliser.

Une part importante (voire dominante) de l'empreinte de la recherche en SIC repose aussi sur les équipements (Paepe et al., 2023). Dès que cela est possible, mettre à disposition des personnels de la recherche un inventaire des équipements et moyens expérimentaux permettrait d'encourager la mutualisation ; l'accessibilité des données doit aussi être favorisée. Il est aussi nécessaire de questionner les besoins de renouvellement en matériel, souvent remplacés avant leur fin de vie, alors que la version déclarée « obsolète » suffit parfois à la majorité des applications auxquelles elle est dédiée. Lorsqu'une panne survient, en particulier pour des appareils ayant dépassé les dates de garanties, avec des frais de remise en état élevés, la réparation doit être envisagée grâce à l'existence de postes dédiés dans les laboratoires et la possibilité de s'appuyer sur un réseau de Fablab (<https://artsetmetiers.fr/fr/quest-ce-quun-fablab>), et grâce au partage d'instruments et de pièces d'occasion.

Concernant les missions, la mutualisation des terrains d'étude est l'occasion de récolter des données ou des échantillons en minimisant le nombre de participants tout en s'ouvrant à l'interdisciplinarité (CNRS Ecologie & Environnement, 2022). Coupler le terrain avec les conférences ou d'autres

collaborations scientifiques permettrait de maintenir les échanges scientifiques internationaux en réduisant les déplacements.

Inclure de la réflexivité dans les activités de recherche

Chacun-e doit saisir que la science et les techniques ne sont pas neutres ; comme les SHS le démontrent depuis longtemps, la recherche menée est située dans les dynamiques sociales, économiques et éthiques de son époque. Il est donc nécessaire de se décentrer afin d'évaluer la proportionnalité entre les impacts des recherches et leurs retombées. Comme l'initiative individuelle est insuffisante, les appels à projet pourraient constituer un outil de cette réflexion en incluant un volet d'évaluation de la responsabilité environnementale du projet. Ceci supposerait que nous soyons formé.es et que nous disposions d'outils adaptés pour faire ces évaluations. Il faut sans doute aussi changer les pratiques de recherche. Une partie des dérives citées dans la partie précédente résultent de la mise en compétition et engendrent un gaspillage de ressources qui pourrait être évité en favorisant la coopération et la mutualisation. Les objets et thématiques de recherche doivent aussi être évalués au regard des impacts environnementaux directs et issus de leur potentielles retombées. Cela peut être encouragé par des liens plus structurés avec des collectifs réflexifs existants tel le GDR Labos 1point5 ou les [différents Ateliers d'écologie politique régionaux](#), mais aussi le recours aux jeux sérieux tels que ma terre en 180' ou Climarisq (<https://climarisq.ipsl.fr/>). À ce titre, il faut encourager et valoriser les changements thématiques dans cette direction (ou élargissements réellement transdisciplinaires) ou les implications dans les collectifs tels que ceux susmentionnés, pour tous les personnels quels que soit leur statut. Une recherche directement construite par et avec la société civile, comme dans le cadre de la recherche action participative, pourrait aussi favoriser une meilleure prise en compte de cette proportionnalité ; cela inclue les leviers de financement (cf. section « Réflexion sur sur les règles et l'orientation des financements »). Le rôle des collaborations lointaines doit aussi être questionné dans le cadre d'une recherche frugale pour pouvoir à la fois défendre cette démarche lorsqu'elle est nécessaire tout en se gardant de tout professoralisme (en particulier vis-à-vis des Suds). Si l'accessibilité des données semble être une perspective intéressante vers une recherche frugale, il faut rester vigilant sur les possibilités de stockage et la gestion des base de données.

Repenser l'organisation de la recherche

Si l'ensemble des enjeux mentionnés dans les axes précédents doivent être favorisés au travers des profils de recrutement à tous les niveaux, leur prise en compte nécessite des changements dans l'organisation de la recherche.

Les verrous aux pratiques vertueuses se situent en effet pour beaucoup à ce niveau, notamment sur la perception d'une recherche de « qualité ». La qualité de la recherche est trop souvent mesurée à l'aune des financements, s'engage donc une course perpétuelle au développement de nouveaux projets afin de répondre à des appels d'offre. L'amélioration continue de la qualité de la donnée ou du modèle est parfois devenu un champ en soi sans se préoccuper de la pertinence de ces optimisations sur les réponses aux problèmes étudiés. La course à la publication, depuis longtemps dénoncée, favorise aussi une course à la quantité plutôt qu'à la qualité des résultats publiés, tout en rendant difficile la veille scientifique, en SIC (Tague & Brandt, 2023) comme ailleurs. Tous ces aspects, associés à la mise en compétition des individus, favorisent la surconsommation voire le gaspillage de ressources, contraire aux impératifs écologiques actuels, sans que les bénéfices pour la qualité de la recherche soient clairs. Cela invite à questionner notre manière de percevoir la qualité de la recherche et à favoriser de manière structurée plus de coopération et de mutualisation. Une interrogation se pose aussi concernant une appétence illimitée au développement d'axes de recherche SIC pour des raisons de sérendipité. On peut se demander si cette approche, dont le rapport coût / bénéfice est probablement infaisable, est défendable en temps de priorisations probables liées à la frugalité nécessaire. Et de demander s'il faut définir des priorités de recherche strictes et à quel échelon, et qui doit le faire ?.

À côté de cela, cet atelier a mentionné une vigilance à agir en améliorant la qualité de vie au travail (et celle de la recherche). Cette réorganisation ne signifie donc pas une réduction systématique des

investissements, au contraire en ce qui concerne les ressources humaines, ni une obsession à réduire pour réduire mais une réallocation des moyens proportionnée à l'impact des activités et à leur retombées potentielles.

Une action concrète pourrait être d'inciter à participer aux comités et commissions ad-hoc afin de favoriser le financement de projets et le recrutement de personnels portant ces nouvelles visions. Plusieurs commissions seront renouvelées en 2024 (CSS IRD, comité EC2CO, ...).

(iii) *Actions phares et jalons. Merci d'indiquer clairement les points saillants du travail de synthèse préliminaire, qui seront abordés lors du colloque de prospectives pour animer des discussions en sessions parallèles,*

L'objet de ce thème n'est pas tant de proposer des outils opérationnels que d'ouvrir la réflexion sur l'exploration de nouvelles voies, la confirmation ou le questionnement de celles existantes, en identifiant au besoin certains angles morts. C'est pourquoi nous nous focalisons ici sur des outils d'intelligence collective qui pourraient être utilisés *durant la prospective elle-même* : afin d'enrichir les propositions développées dans les quatre paragraphes précédents.

(iv) *Exprimer les besoins éventuels à discuter et à qui ils doivent être adressés,*

De nombreux besoins ont été identifiés, avec souvent une adresse au niveau institutionnel.

Besoin de trajectoires et d'accompagnement pour évaluer et réduire l'impact réel de nos recherches

Des objectifs ambitieux de réduction des impacts environnementaux de la recherche, au minimum à la hauteur des exigences imposées par l'accord de Paris concernant les gaz à effet de serre, doivent être définis par les tutelles, accompagnés de trajectoire et d'outils d'aide à leur mise en place (en privilégiant les solutions open source tels les outils déjà développés par les collectifs mentionnés ci-dessus). Pour cela, l'intégration de critères sur la responsabilité environnementale dans les activités de recherche devrait être systématisée à toutes les étapes de la carrière, dans les appels à projets et les évaluations des unités. Des personnels supports, idéalement à l'échelle des laboratoires, devraient être recrutés afin d'aider à l'évaluation de l'impact environnemental des projets et des unités, afin de faciliter le dialogue et la mise en place des mesures et leur suivi pour suivre les trajectoires définies. L'exemplarité des tutelles devrait aussi être de mise, dans les choix de banques, les partenariats avec les entreprises et les fondations, les lieux et modalités de réunions des instances, les choix des marchés.

Besoin de réflexion sur les règles et l'orientation des financements

La recherche frugale doit être promue au travers des sources et organismes de financement. Des budgets carbone voire environnementaux pourraient être alloués à ces organismes, comme à l'ANR. Les candidat.e.s pourraient, grâce à l'appui de personnels dédiés, proposer des plans de gestion de l'empreinte environnementale et justifier le rapport coût environnemental, retombées des projets. La mutualisation, la réutilisation, la vente d'occasion ou l'échange doivent être encouragés au travers d'outils développés par les tutelles. En ce sens, la bourse au matériel du CNRS constitue une avancée à développer et à consolider. Plus en amont, ces problématiques pourraient être abordées avec des mécanismes et un fléchage d'une partie des finances de la recherche vers des thématiques co-construite par et pour la société civile (p. ex. proposition du projet collectif Horizon Terre que 10% du budget recherche soit fléché par des conventions citoyennes - <https://horizon-terre.org/ht/>).

Par ailleurs, les financements ou partenariats avec des entreprises privées doivent faire l'objet d'un cadre éthique afin d'exclure les acteurs contribuant démesurément à la dégradation de l'environnement. Un moyen simple de réduire l'impact environnemental est de favoriser les financements en ressources humaines relativement aux équipements avec une autre retombée vertueuse, plus de support pour optimiser l'utilisation des équipements et leur réparation. Le renforcement des crédits récurrents au détriment des financements sur projet éviterait aussi l'achat

d'équipements et la perte de compétence. Les marchés avec extension de garantie doivent devenir la norme.

Besoin de formation et de reconnaissance de l'investissement des personnels

Les personnels SIC sont en première ligne pour réaliser la formation car les surfaces et interfaces continentales concentrent de nombreux impacts ainsi qu'une part des leviers d'atténuation et d'adaptation. Cependant une reconnaissance institutionnelle de cet investissement dans les recrutements, évaluations et promotion doit être mise en place, à la fois en tant que formateur mais aussi pour le temps nécessaire à se former à ces enjeux. En parallèle, des moyens doivent être mis en place pour former les personnels à la réflexivité sur leurs pratiques et un point d'entrée commun, une organisation et une communication plus efficace doit être développée pour l'existant.

3/ Aspects transverses :

Décrire les aspects transverses (formation (apprentissage, continue, ...), moyens, les RH/métiers/compétences/outils à maintenir/développer/inventer, l'égalité des chances, Recherche au Sud, responsabilité environnementale ...) identifiés lors du travail préliminaire en atelier (non finalisé). Exprimer les besoins éventuels qui seraient spécifiques aux aspects transverses à discuter et à qui ils doivent être adressés.

Cet atelier est transverse par essence, car la responsabilité environnementale se décline dans les activités de recherche en général, au-delà même des SIC. Nous renvoyons donc à la section précédente pour l'essentiel.

On peut néanmoins noter qu'au niveau de la prospective elle-même, cet atelier résonne particulièrement avec deux thèmes : « Observons nos observatoires » (atelier 3) car la réflexion autour de nos méthodes de recherche questionne les objets que sont nos observatoires, depuis le design-même et l'imbrication territoriale d'un observatoire jusqu'aux impacts de la manière d'acquérir et la façon de stocker les données des observatoires ; « Continuum sciences-sociétés et transdisciplinarité » (atelier 5) car la réflexivité proposée en responsabilité environnementale s'ancre dans les notions d'habitabilité planétaire, de responsabilité sociétale, et de décloisonnement des disciplines.

4/ Éléments éventuels pour alimenter le bilan des dernières prospectives :

Identifier les éléments de bilan des dernières prospectives SIC 2017-2022 (~≤10 lignes - non finalisé) qui ont été traités et comment ceux-ci alimentent la présente prospective (par ex : nouvelles thématiques/compétences, nouveaux outils/métiers qui n'auraient pas été identifiés lors des dernières prospectives, thématiques qui auraient particulièrement avancé ou bien au contraire qui n'auraient pas pu se développer au regard des objectifs annoncés dans les dernières prospectives)

La précédente prospective ne traitait pas explicitement de la responsabilité environnementale des recherches SIC et de ses acteurs. Certains axes des prospectives s'appuyaient sur les objectifs de développement durable (ODD) pour mettre en lumière les retombées potentielles du développement scientifiques des recherches dans ces domaines. En revanche, la question du coût environnemental des activités n'était pas posée, ni par conséquent la proportionnalité (entre impacts négatifs et retombées positives) des recherches. Les questions éthiques associées à la responsabilité environnementale des chercheur·euse·s, à leurs choix de thématiques ou d'objets de recherche restaient aussi inexplorées (on peut questionner également des cadres thématiques de la durabilité comme les Objectifs de Développement Durable). Il semble donc d'autant plus important de dédier un atelier et d'ouvrir un espace de prise de recul sur nos pratiques et nos objets de recherche afin d'intégrer la question de la prise en compte des enjeux environnementaux dans nos métiers.

Bibliographie

- Ari, T. B., Lefort, G., Mariette, J., Aumont, O., Jeanneau, L., Santerne, A., ... & Philippe-Emmanuel, R. (2023). Flight Quotas Hold the Most Significant Potential for Reducing Carbon Emissions from Academic Travel. EarthArXiv preprint. <https://doi.org/10.31223/X5WD5H>
- Attari, S.Z., Krantz, D.H. & Weber E.U. (2016). Statements about climate researchers' carbon footprints affect their credibility and the impact of their advice. *Climatic Change* 138, 325–338. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1713-2>
- Attari, S.Z., Krantz, D.H. & Weber, E.U. (2019). Climate change communicators' carbon footprints affect their audience's policy support. *Climatic Change* 154, 529–545. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02463-0>
- Aujoux, C., Kotera, K., & Blanchard, O. (2021). Estimating the carbon footprint of the GRAND project, a multi-decade astrophysics experiment. *Astroparticle Physics*, 131, 102587.
- Bloom, K., Boisvert, V., Britzger, D., Buuck, M., Eichhorn, A., Headley, M., ... & Merkel, P. (2022). Climate impacts of particle physics. arXiv preprint arXiv:2203.12389. [arXiv:2203.12389](https://arxiv.org/abs/2203.12389)
- Bonamy, C., Boudinet, C., Bourgès, L., Dassas, K., Lefèvre, L., et al.. Je code : les bonnes pratiques en éco-conception de service numérique à destination des développeurs de logiciels. 2022, pp.1-19. [hal-03009741v5](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03009741v5)
- Carbou G., Sébastien L. (2023). Les discours d'inaction climatique dans la communauté scientifique, *Écologie & politique*, 2023/2 (N° 67), p. 71-91. URL : <https://www.cairn.info/revue-ecologie-et-politique-2023-2-page-71.htm>
- CNRS Ecologie & Environnement (2023). Prospective 2023, <https://www.inee.cnrs.fr/fr/prospectives-cnrs-ecologie-environnement-2023>.
- COMETS (2023), Entre liberté et responsabilité : l'engagement public des chercheurs et chercheuses, Avis n°2023-44, <https://comite-ethique.cnrs.fr/>
- De Paepe, M., Jeanneau, L., Mariette, J., Aumont, O., & Estevez-Torres, A. (2023). Purchases dominate the carbon footprint of research laboratories. bioRxiv, 2023-04. <https://doi.org/10.1101/2023.04.04.535626>
- Knödseder, J., Brau-Nogué, S., Coriat, M. et al. (2022). Estimate of the carbon footprint of astronomical research infrastructures. *Nature Astronomy* 6, 503–513. <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01612-3>
- Lamb, W. F., Mattioli, G., Levi, S., Roberts, J. T., Capstick, S., Creutzig, F., ... & Steinberger, J. K. (2020). Discourses of climate delay. *Global Sustainability*, 3, e17, doi:10.1017/sus.2020.13.
- Marc, O., et al. (2023): The share of research infrastructure in comprehensive greenhouse gas budget for five French Earth and Space Science laboratories, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 23–28 Apr 2023, EGU23-8402, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-8402>.
- Mariette, J., Blanchard, O., Berné, O., Aumont, O., Carrey, J., Ligozat, A., et al. (2022). An open-source tool to assess the carbon footprint of research. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 2(3), 035008. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac84a4>
- Stevens, B., et al. (2021): EUREC4A, *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 4067–4119, <https://doi.org/10.5194/essd-13-4067-2021>.
- Tague, C., and W.T. Brandt (2023). Critical zone science in the Western US—Too much information?. *Frontiers in Water* 5: 1226612. <https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1226612>