



**HAL**  
open science

## **Prospective en sciences de la planète et de l'univers**

Cyril Moulin, Nicolas Arnaud, I Boisse, C Ceccarelli, F Combes, X Delfosse,  
Jean-François Donati, Agnès Fienga, M Gargaud, M Langlois, et al.

► **To cite this version:**

Cyril Moulin, Nicolas Arnaud, I Boisse, C Ceccarelli, F Combes, et al.. Prospective en sciences de la planète et de l'univers. INSU, CNRS. 2021. <insu-04782576>

**HAL Id: insu-04782576**

**<https://insu.hal.science/insu-04782576v1>**

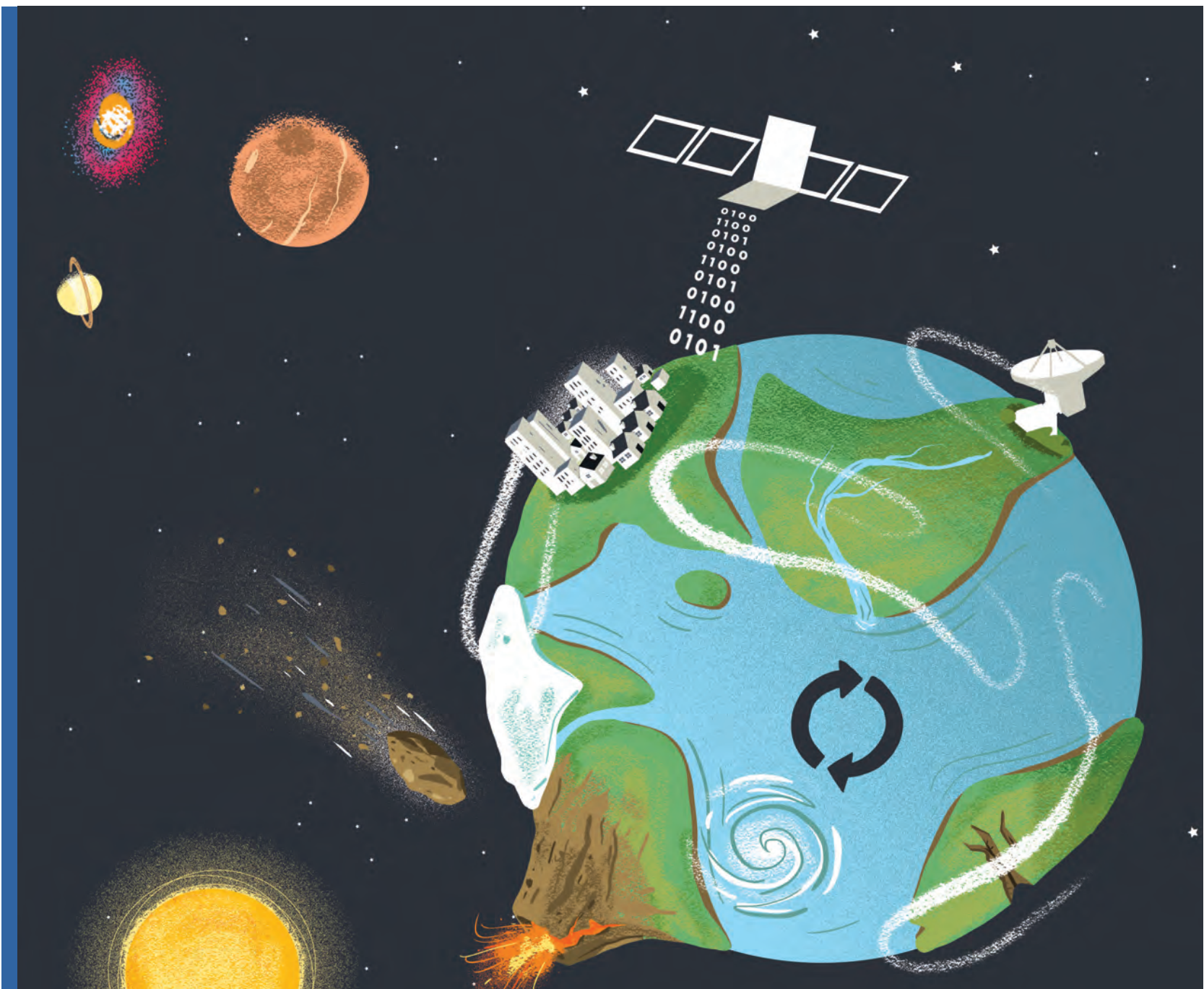
Submitted on 14 Nov 2024

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

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



HAL Authorization



# PROSPECTIVE

EN SCIENCES DE LA PLANÈTE ET DE L'UNIVERS

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS

# Prospective 2020-2025 en sciences de la planète et de l'Univers

SYNTHÈSE DES ATELIERS ET DU COLLOQUE DE CLÔTURE DE L'EXERCICE DE PROSPECTIVE  
TRANSVERSE INSU

Sous la coordination de la direction de l'INSU.

**Coordination éditoriale**

Anne Brès

**Impression**

CNRS DR1 IFSEM secteur de l'imprimé

**Conception / Maquette**

CBA Design / Page B

**Septembre 2021**

Photo de couverture : impression d'artiste de la surface de Pluton (image retouchée). Crédit: ESO / L. Calçada

## SOMMAIRE

<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>7</b>
Organisation de la prospective transverse	7
Les 17 défis transverses en sciences de la planète et de l'Univers	8
<b>DÉFI 1 : ORIGINE DE LA TERRE DANS L'UNIVERS</b>	<b>10</b>
1. Des sujets porteurs et demandeur d'interdisciplinarité	12
2. Recommandations	16
Encadré : quelques retours d'expérience sur l'interdisciplinarité	17
<b>DÉFI 2 : SIGNATURE D'HABITABILITÉ DES PLANÈTES ET EXOPLANÈTES</b>	<b>19</b>
1. Des sujets porteurs et demandeur d'interdisciplinarité	20
2. Recommandations	24
<b>DÉFIS 3 ET 4 : ENREGISTREMENT GÉOLOGIQUE DES CRISES ENVIRONNEMENTALES ET INTERACTIONS ENTRE CRISES ENVIRONNEMENTALES ET ÉCOSYSTEMES</b>	<b>26</b>
1. Questions et verrous scientifiques identifiés, pistes à explorer	29
2. Recommandations	36
<b>DÉFI 5 : MODÉLISATION INTÉGRÉE DU SYSTÈME TERRE POUR L'ÉTUDE DES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX ET DE LA VULNÉRABILITÉ DES SOCIO-ÉCOSYSTÈMES</b>	<b>39</b>
1. Questions scientifiques	42
2. Recommandations	46
<b>DÉFI 6 : INTERACTIONS ENTRE CYCLES LONGS ET CYCLES COURTS POUR LA MISE EN PLACE DES RESSOURCES</b>	<b>48</b>
1. Enjeux et questionnements scientifiques	51
2. Recommandations	56

<b>DÉFI 7 : RÔLE DU VIVANT DANS LES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES ET SUR LA MISE EN PLACE DES RESSOURCES</b>	<b>58</b>
1. Enjeux scientifiques thématiques	61
2. Recommandations	63
<b>DÉFI 8 : MILIEUX POLAIRES</b>	<b>65</b>
1. Quels projets pour quels verrous ?	68
2. De l'importance des observations, de l'instrumentation et des infrastructures	71
3. Recommandations	72
Encadré : TGIR et intérêt de sites instruments communs	73
<b>DÉFI 9 : LA ZONE INTERTROPICALE AU REGARD DE SA VULNÉRABILITÉ FACE AUX CHANGEMENTS GLOBAUX</b>	<b>74</b>
1. Thèmes scientifiques	75
2. Recommandations	78
<b>DÉFI 10 : CONTINUUM ET INTERFACES TERRE-MER</b>	<b>80</b>
1. Enjeux scientifiques et/ou technologiques	82
2. Recommandations	87
<b>DÉFI 11 : ENVIRONNEMENTS URBAINS</b>	<b>89</b>
1. Enjeux scientifiques	91
2. Recommandations	97
<b>DÉFI 12 : NANOSATELLITES</b>	<b>99</b>
1. Les grands enjeux	101
2. Recommandations	103
<b>DÉFI 13 : DE LA PRODUCTION DE DONNÉES À LEUR EXPLOITATION SCIENTIFIQUE</b>	<b>104</b>
1. État de l'art et enjeux	106
2. Recommandations	111
<b>DÉFI 14 : ACCÈS OUVERT AUX DONNÉES</b>	<b>114</b>
1. Contexte et enjeux	116
2. Recommandations	119
Encadré : recommandations détaillées du défi « accès aux données »	120

<b>DÉFI 15 : NOUVEAUX CAPTEURS ENVIRONNEMENTAUX</b>	<b>122</b>
1. Atouts, manques et besoins	124
2. Moyens	126
3. Recommandations	128
Encadré : récapitulatif des recommandations	131
<hr/>	
<b>DÉFI 16 : INSTRUMENTATION EN MILIEUX EXTRÊMES</b>	<b>132</b>
1. Atouts, manques et besoins	133
2. Recommandations	136
Encadré : récapitulatif des recommandations	138
<hr/>	
<b>DÉFI 17 : VERS <i>L'EXASCALE</i>: CONVERGENCE HPC ET HPDA ?</b>	<b>139</b>
1. Enjeux	141
2. Recommandations	143
<hr/>	
<b>QUESTIONS TRANSVERSES</b>	<b>144</b>
1. Intégration aux ODD et liens avec la transition énergétique et écologique	145
2. Communication, diffusion de la connaissance	149
3. Sciences participatives : co-production de connaissances et co-construction de solutions	152
4. Liens avec l'industrie	154
<hr/>	
<b>CONCLUSIONS</b>	<b>156</b>
1. Un premier exercice réussi	157
2. Implémenter la mise en œuvre des projets scientifiques transverses	158
3. Soutenir l'instrumentation, l'innovation technologique et l'intégration de l'observation	159
4. Être le moteur de l'écosystème national de la donnée en SDUE	159
5. Être le promoteur d'un écosystème national de recherche et formation du hpc, à l'interface avec les données	160
6. Être ressource...	161
<hr/>	
<b>ANNEXE : RECENSEMENT DE L'IMPLICATION DES OSU SUR LA THÉMATIQUE DES RISQUES</b>	<b>162</b>
<hr/>	

# Remerciements

Lancer une prospective scientifique transverse à tout l'Institut national des sciences de l'Univers faisait partie des actions que je m'étais engagées à mener lorsque j'ai présenté ma candidature à la direction au printemps 2018. Ma conviction était, et est toujours, qu'un tel exercice de réflexion collective est primordial en interne à l'INSU pour développer la transversalité et éviter le cloisonnement des disciplines, au sein du CNRS pour renforcer l'interdisciplinarité et les liens avec les autres instituts, et vis-à-vis de nos partenaires pour partager les grands défis scientifiques et renforcer la stratégie nationale en sciences de l'Univers et de la planète.

Si l'idée semble simple, la mise en œuvre d'une telle prospective nationale pour la première fois s'est avérée complexe et je remercie Cyril Moulin d'avoir accepté de la coordonner avec constance et ténacité pendant 2 années : depuis son lancement, à l'occasion d'une réunion des directeurs et directrices d'OSU en octobre 2018, jusqu'au colloque de restitution en novembre 2020, et enfin en finalisant ce document. Comme vous l'imaginez, la crise sanitaire qui a frappé le monde début 2020 et les confinements successifs n'ont pas facilité ce travail basé sur des échanges et des ateliers dont quelques-uns n'ont pas pu se tenir en présentiel.

Malgré l'ambition du projet et la complexité du contexte, force est de reconnaître que cette première prospective a été un succès, au-delà même de nos espérances initiales. Elle le doit en premier lieu à l'implication remarquable de vous toutes et tous, chercheurs, ingénieurs et techniciens de l'INSU et de nos partenaires, qui avez répondu présent pour organiser et participer aux discussions et aux ateliers de chacun des défis identifiés. Je vous en remercie chaleureusement.

Je tiens aussi à remercier tout particulièrement les directeurs et directrices des OSU qui ont depuis le début accompagné avec enthousiasme ce projet en animant les discussions en interne pour faire remonter des défis, puis en organisant et en accueillant les ateliers nationaux de 2-3 jours au sein de leur structure. Ce furent des journées d'échanges denses et excitantes.

Je remercie aussi chaleureusement les animateurs scientifiques qui ont construit avec ténacité et conviction le programme des ateliers, coordonné les discussions et synthétisé les échanges pour en tirer les questions prioritaires et proposer des actions à mettre en œuvre pour renforcer la transversalité au sein de l'INSU et aborder les grands défis scientifiques à venir. Le présent document reprend, nous l'espérons, l'essentiel de foisonnante matière de ces échanges.

Un grand merci aussi à l'équipe de direction de l'INSU au sein de laquelle l'enthousiasme et la motivation permanente ont été un grand soutien pour porter cette prospective. Chaque DAS a contribué à cette réussite, c'est ce qui fait aussi la force de notre institut. Mes remerciements vont aussi à la cellule de communication de l'INSU qui nous a permis de tenir un colloque final de grande qualité en virtuel.

Je conclurai ces remerciements en saluant le soutien et l'implication des organismes partenaires de l'INSU qui ont accompagné cette prospective pendant les deux ans au sein du comité inter-organismes (CIO). Cet exercice dépassait le cadre de l'INSU et je leur suis infiniment reconnaissant d'y avoir pleinement participé. Cette prospective ouvre des perspectives communes qui, j'en suis persuadé, vont nous donner un cadre de collaboration renouvelé pour relever ensemble les défis qui nous attendent en sciences de la planète et de l'Univers.

Nicolas Arnaud  
Directeur de l'INSU

# INTRODUCTION

## Organisation de la prospective transverse

Depuis près de 35 ans, l'INSU pilote et coordonne la recherche en sciences de la planète et de l'Univers en offrant à la communauté nationale avions, bateaux, grands instruments de mesure et de modélisation, infrastructures et programmes qui sont les outils de l'excellence des communautés françaises, reconnues pour leur rayonnement international. Pour la première fois de son histoire, l'INSU a organisé une prospective transverse à ses quatre domaines disciplinaires : Terre solide, surfaces et interfaces continentales, océan et atmosphère, astronomie et astrophysique. L'objectif de cet exercice était de définir les défis scientifiques interdisciplinaires sur lesquels l'INSU sera collectivement transformant dans les 5 à 10 années à venir et affichera son engagement vis-à-vis de la recherche fondamentale, des approches interdisciplinaires et des grandes questions sociétales.

À l'instar des prospectives de domaine qu'elle complète, cette prospective a été largement ouverte aux partenaires avec lesquels l'INSU partage des laboratoires, des observatoires, des infrastructures ou des projets de recherche : autres instituts du CNRS, organismes de recherche, universités et écoles. La composition du comité inter-organisme qui a été mis en place dans le cadre de cette prospective reflète cette volonté.

La première phase de cette prospective (fin 2018 – mi-2019) s'est appuyée sur les Observatoires des sciences de l'Univers (OSU) ainsi que sur le conseil scientifique de l'INSU (CSI) et les commissions spécialisées des domaines pour définir les 17 défis pour lesquels des réflexions collectives et transverses permettraient de discuter et de définir les priorités scientifiques, technologiques et organisationnelles pour l'INSU.

Ces réflexions ont été menées au cours de la seconde phase de la prospective (mi-2019 – mi-2020) sous la forme d'ateliers nationaux de 2-3 jours accueillis et organisés par les OSU. Ces ateliers ont rassemblé entre 50 et 80 personnes et ont fourni des rapports qui sont à la base du présent document. Ce sont donc près de 1000 hommes et femmes, scientifiques ou soutien à la recherche qui ont permis d'élaborer les conclusions présentées.

Menée dans un contexte de travail dégradé lié à la crise sanitaire, cette prospective s'est achevée en novembre 2020 par un colloque virtuel de deux jours lors duquel l'ensemble des résultats des ateliers ont été présentés et les grandes lignes des priorités scientifiques et organisationnelles ont été tracées.

Ces éléments sont repris dans le présent rapport qui doit servir de guide pour l'INSU dans les 5-10 prochaines années.

# Les 17 défis transverses en sciences de la planète et de l'Univers

Avant de lancer cette prospective, la direction de l'INSU avait identifié une série de thématiques pour lesquelles il lui semblait important de mener des réflexions croisées entre les quatre domaines de l'Institut :

## 1. Recherche et enjeux sociétaux :

- Les origines, ou comment l'Univers et la Terre sont devenus habitables ;
- Les grandes crises, ou comment le passé peut éclairer l'actuel ;
- Les risques et les socio-écosystèmes ;
- Les ressources et les cycles naturels.

## 2. Endroits et moments sensibles, vis-à-vis des changements globaux

## 3. Recherche et verrous technologiques :

- Le spatial ;
- Données, modèles et systèmes complexes ;
- Instrumentation pour l'environnement.

## 4. Sciences et sociétés

Ces thématiques ont servi de bases aux réflexions menées au sein de chaque OSU pour faire remonter des propositions de défis. Dans ce cadre, environ 150 propositions ont été formulées puis analysées par le conseil scientifique de la prospective (constitué de membres du CSI et des commissions spécialisées) et enfin validées par le CIO de la prospective, pour aboutir aux 17 défis qui ont donné lieu à des ateliers nationaux. Ces défis sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Défis Transverses	Organisation	Dates de l'atelier
<b>Recherche et enjeux sociétaux</b>		
<b>1.</b> Origine de la Terre dans l'Univers	OCA	23-24 janvier 2020 (Nice)
<b>2.</b> Signatures d'habitabilité des planètes et exoplanètes	Pythéas	07 sept. 2020 (virtuel)
<b>3.</b> Identification et compréhension des grandes crises	OTELo	17-19 déc. 2019 (Dijon)
<b>4.</b> Interactions entre crises environnementales et écosystèmes	THETA	17-19 déc. 2019 (Dijon)
<b>5.</b> Modélisation intégrée du système Terre pour l'étude des risques environnementaux	OSUG	10-12 fév. 2020 (Grenoble)
<b>6.</b> Interactions entre cycles longs et cycles courts pour la mise en place des ressources	OSUR	juin-juillet 2020 (virtuel)
<b>7.</b> Rôle du vivant sur les cycles et sur la mise en place des ressources	IUEM	9-11 mars 2020 (Brest)
<b>Endroits et moments sensibles</b>		
<b>8.</b> Milieux polaires	OVSQ-EcceTerra	5-7 fév. 2020 (Paris)
<b>9.</b> Zone Intertropicale	OSU-R	24-25 fév. 2020 (Montpellier)
<b>10.</b> Continuum Terre-Mer	OASU	11-13 fév. 2020 (Bordeaux)
<b>11.</b> Environnements urbains	EFLUVE-EcceTerra	20-21 jan. 2020 (Créteil)
<b>Recherche et verrous technologiques</b>		
<b>12.</b> Nano-satellites	OP	9-10 jan. 2020 (Paris)
<b>13.</b> De la production de données à leur exploitation scientifique	OMP	5-7 mars 2020 (Toulouse)
<b>14.</b> Accès ouvert aux données scientifiques	ObAS-EOST	20-21 jan. 2020 (Strasbourg)
<b>15.</b> Nouveaux capteurs environnementaux	Stations Marines	15-17 jan. 2020 (Banyuls)
<b>16.</b> Instrumentation en milieux extrêmes	OPGC	30-31 jan. 2020 (Clermont)
<b>17.</b> Vers l'exascale : convergence HPC et HDA	IPSL	14-15 jan. 2020 (Paris)

Les défis 1 à 7 couvrent la thématique « **Recherche et enjeux sociétaux** », les défis 8 à 11 la thématique « **Endroits et moments sensibles** » et les défis 12 à 17 la thématique « **Recherche et verrous technologiques** ».

Pour les défis « **Recherche et enjeux sociétaux** », il était demandé aux organisateurs d'être attentifs à s'appuyer au mieux sur les éléments disponibles dans les prospectives de domaine, notamment en mettant en évidence les convergences ou les complémentarités entre ces prospectives, et à mener les échanges pour donner une cohérence d'ensemble aux recherches menées à l'INSU dans le périmètre du défi. Le fait que des communautés de recherches très différentes soient regroupées au sein d'un même défi est une vraie plus-value pour proposer des actions concrètes et réalistes dont la direction de l'INSU pourra s'emparer pour porter ce défi, y compris au niveau national.

Pour les défis « **Endroits et moments sensibles** », il était demandé aux organisateurs de s'appuyer sur les prospectives de domaine mais aussi sur les expériences précédentes menées à l'INSU comme les « chantiers » AMMA ou MISTRALS ou certaines actions géographiques des programmes nationaux. L'intérêt principal de focaliser des recherches sur un milieu est de promouvoir l'interdisciplinarité dans l'approche des questions scientifiques en rapprochant physiquement des communautés différentes. Cette approche géographique doit aussi permettre des collaborations renforcées avec d'autres instituts du CNRS ainsi qu'avec d'autres partenaires de recherche dont les priorités peuvent se décliner dans le cadre de ces défis. Pour certains de ces défis au moins (milieux polaires et zone intertropicale), la dimension internationale, notamment le rôle de la France pour la diplomatie scientifique, joue un rôle important en termes de positionnement de la France et de collaborations à mettre en place.

Pour les défis « **Recherche et verrous technologiques** », il était demandé aux organisateurs de s'assurer d'impliquer de façon exhaustive les chercheurs et les ingénieurs potentiellement concernés et travaillant dans les différents laboratoires et OSU, tous domaines confondus. L'ensemble de ces défis visent à préparer au mieux l'INSU à s'emparer de façon volontariste et collective des grandes évolutions technologiques et méthodologiques de la prochaine décennie sur lesquelles s'appuieront les recherches scientifiques, que ce soit le *new space*, la miniaturisation des capteurs, le *big data*, l'intelligence artificielle, les nouveaux calculateurs ou la science ouverte. Ces défis éminemment transverses à

l'INSU doivent permettre de définir une stratégie pour gagner en efficacité en limitant la duplication des efforts et de proposer des priorités pour le maintien ou le renforcement des compétences et des outils qui permettront à l'INSU de continuer à mener une recherche au meilleur niveau dans 10 ans.

La thématique « **Sciences et sociétés** » n'a pas donné lieu à un défi spécifique, mais il a été décidé d'aborder les questions qui s'y rattachent de façon transverse au sein de chaque atelier, à savoir :

- Intégration aux ODD et liens avec la transition énergétique et écologique;
- Communication, diffusion de la connaissance (nouvelles approches liées à la science ouverte, mettre en forme pour une diffusion vers le public ou les décideurs, réagir aux *fake news*, différences entre observation, surveillance et gestion de crise...);
- Sciences participatives: co-production de connaissances et co-construction de solutions (densification des observations, évaluation de leur qualité, articulation des savoirs académiques et non académiques, co-construction de solutions partagées et soutenables face à des enjeux sociétaux...);
- Liens avec l'industrie.

Deux autres questions importantes ont aussi été abordées systématiquement dans chaque atelier concernant les collaborations à mettre en place, les moyens à mettre en œuvre (appels à projets, réseaux métiers, GDR, formations...) ainsi que les compétences (nouveaux métiers...) et les outils (en modélisation, instrumentation, méthodologie, infrastructures, calcul...) du futur afin de donner à l'INSU les clés pour se préparer à relever les grands défis des années à venir.

1- Analyse Multidisciplinaire de la Mousson

2- Mediterranean Integrated STudies at Regional And Local Scales

# Défi 1

## Origine de la Terre dans l'Univers

L'atelier a été structuré en deux parties. La première partie était consacrée à l'état des lieux et la prospective de l'interdisciplinarité concernant le défi qui fait l'objet de cet atelier; la deuxième partie à la formulation d'une série de recommandations à la direction de l'INSU (voire du CNRS) pour favoriser les actions interdisciplinaires. Bien qu'il soit clair pour tous que l'interdisciplinarité bénéficierait grandement de plus de moyens et des recrutements ciblés, étant donné le contexte actuel de la recherche fondamentale en France, nous nous sommes volontairement restreints à des recommandations « à coût nul », c'est-à-dire à des recommandations de réorganisation des structures ou de leur fonctionnement, n'impliquant pas forcément une augmentation des postes ou des budgets.

L'atelier a été organisé sous la responsabilité de l'Observatoire de la Côte d'Azur par le Conseil scientifique composé de : I. Boisse, C. Ceccarelli, F. Combes, X. Delfosse, J.F. Donati, A. Fienga, M. Gargaud, M. Langlois, G. Libourel, S. Mazevet, A. Mocquet, A. Morbidelli, F. Selsis, M. Wicczorek.



# 1. Des sujets porteurs et demandeurs d'interdisciplinarité

## LES INTERACTIONS ÉTOILE-PLANÈTE ET ÉTOILE-DISQUE DANS LA PHASE PRÉ-SÉQUENCE PRINCIPALE

Les études sur les interactions étoiles-exoplanètes sont pluridisciplinaires à plusieurs titres :

- d'un point de vue astrophysique, les approches observationnelles incluent la combinaison de nombreuses techniques complémentaires et les développements théoriques requièrent d'explorer des conditions de physique des plasmas, de magnéto-hydro-dynamique dans des domaines très variés;
- à l'intérieur de l'INSU, elles sont à l'interface entre les programmes nationaux de physique stellaire, planétologie et milieu interstellaire, et sont enrichies par les apports du PNST (Soleil-Terre);
- avec d'autres instituts du CNRS: les processus physiques en jeu induisent des discussions avec d'autres domaines de la physique, comme la physique non-linéaire, la physique atomique et moléculaire.

Plusieurs grandes questions sont encore ouvertes à ce jour et nécessitent davantage de collaborations interdisciplinaires :

- le rôle des interactions de marée dans l'évolution des étoiles et des planètes (rotation, structure interne, induction magnétique, évolution séculaire des systèmes);
- le rôle des connexions magnétiques et la quantité d'énergie mise en jeu dans celles-ci impliquent des grandeurs observables liées à des systèmes planétaires;
- le rôle de l'irradiation stellaire et des interactions avec le vent stellaire dans l'éventuel échappement des atmosphères d'exoplanètes;
- les interactions entre les hautes atmosphères planétaires et le vent stellaire;
- les ressemblances et divergences entre les exoplanètes et les planètes du Système Solaire, ainsi que le rôle des conditions physiques différentes dans leurs interactions avec leur environnement;
- la caractérisation des transitions observées dans les spectres stellaires pour estimer le champ magnétique des étoiles (mesures ou calculs des facteurs de Landé);
- l'étude statistique des systèmes extrasolaires connus et à venir qui éclairent les processus dominants dans leur formation et évolution en interaction avec l'étoile.

Dans ce domaine, nous recommandons essentiellement des collaborations plus approfondies entre astrophysiciens français, notamment observateurs et théoriciens engagés dans ces thématiques, et un rapprochement avec les planétologues et experts de la relation Soleil-Terre - sous les formes conventionnelles de co-directions de thèses et

d'écoles thématiques. Pour les quelques domaines touchant des processus physiques mal connus dans les conditions extrêmes des exoplanètes, nous recommandons de chercher de nouveaux ponts avec des chercheurs INP ou INSIS pour identifier les besoins.

Les interactions étoile-disque concernent essentiellement la structure du bord interne du disque et le mécanisme d'accrétion/éjection du gaz par l'étoile centrale. Ce thème de recherche, à la frontière entre la planétologie et la physique stellaire, combine à la fois des observations de pointe (par interférométrie avec AMBER/PIONIER/GRAVITY et par spectro-imagerie, par exemple pour la détection de la rotation des jets qui renseigne sur la taille de la région affectée par l'éjection) et de la modélisation théorique extrêmement complexe. Cette dernière relève de la physique des plasmas et de la magnéto-hydrodynamique et requiert des méthodes numériques poussées; elle est donc un terrain potentiellement fertile de collaboration entre l'INSU (section 17), l'INP (section 4) et l'INSIS (section 10). Mais le couplage entre le champ magnétique et le gaz dépend aussi de l'ionisation de ce dernier et donc de sa chimie (par le biais des potentiels de ionisation des différentes espèces, des réactions ions-neutres en phase gazeuse et piégeage des ions par les poussières) qui doit être précisément modélisée, ce qui ouvre un axe de synergie avec l'INC et au recours à des expériences de laboratoire.

## L'HÉRITAGE INTERSTELLAIRE CHIMIQUE ET CINÉMATIQUE DE LA FORMATION PLANÉTAIRE

Les deux dernières décennies nous ont montré l'existence d'une grande variété des systèmes planétaires, même en ne se basant que sur les informations relativement limitées dont nous disposons (orbites, masses, densités). Il est clair que la formation d'un système planétaire dépend fortement de l'environnement dans lequel il est né, et notamment de son héritage chimique (composition élémentaire - par exemple le rapport C/O - mais aussi l'abondance d'éléments radioactifs) et cinématique du nuage moléculaire (*i.e.* l'histoire de l'accrétion) à l'origine du système étoile-disque. Les deux sont, par ailleurs, fortement liés entre eux, car la composition chimique de la matière affecte son évolution cinématique et vice versa. Un exemple évident de cette interdépendance est fourni par l'action du champ magnétique sur la cinématique, qui dépend fortement de la ionisation du gaz, ce qui veut dire de sa composition chimique.

En plus de la diversité entre systèmes planétaires, les différents corps du système solaire montrent aussi une très grande diversité chimique et isotopique et il n'est toujours pas clair quelle est la part de l'héritage interstellaire et celle

de l'évolution au sein du disque (ou dans les corps eux-mêmes) dans cette diversité. Bien évidemment, la partie chaude du disque permet des réactions impossibles dans le milieu interstellaire; cependant, même dans les régions distantes et froides du disque, des réactions improbables dans le milieu interstellaire pourraient avoir lieu grâce à la densité moléculaire plus élevée. Les contraintes observationnelles proviennent de l'étude des grains présolaires, de la matière organique et des éléments volatils dans différentes classes des météorites, dans les comètes et les poussières (notamment les UCAMM, les plus carbonées entre elles). En particulier, la mission Rosetta a fourni des résultats sans précédents sur la composition chimique et isotopique d'une comète qui semble venir de la partie la plus lointaine du disque protoplanétaire, en détectant - entre autres - l'oxygène moléculaire, qui devrait être un clair héritage interstellaire. En parallèle, les observations astronomiques, surtout dans les domaines du radio et de l'infra-rouge, sondent la composition des nuages moléculaires et des disques qu'y sont encore enfouis, et aussi leur cinématique (distribution du moment cinétique). Et, dans un futur proche, avec JWST et ARIEL, nous aurons accès de plus en plus à la composition chimique des atmosphères des exoplanètes. Il n'y a aucun doute qu'elle nous apportera des contraintes formidables sur le processus de leur formation et leur évolution.

Cependant, pour interpréter toutes les informations apportées par ces observations, nous avons besoin d'être capables de pouvoir retracer et maîtriser les processus chimiques pendant les différentes étapes de la formation et l'évolution du disque et des corps (planétésimaux, planètes) en son sein. Nous sommes pour le moment loin de cela et plusieurs aspects nécessitent des collaborations interdisciplinaires, notamment entre les astrophysiciens (qui étudient le système solaire, les exoplanètes et les systèmes planétaires en formation) d'un part, et les chimistes (qui étudient ce qu'on appelle la cosmochimie; voir aussi le point c plus en bas) ainsi que les experts numériques, d'autre part.

Probablement il n'est pas inutile de rappeler que la chimie interstellaire est dominée par les effets cinétiques plutôt que thermodynamiques, comme sur Terre, ce qui constitue un champ de recherche très spécialisé en soi en chimie. Pour maîtriser la chimie interstellaire il est donc fondamental qu'il existe une forte interaction entre les chimistes et les astrophysiciens, et cela implique des expériences de laboratoire sophistiquées et des simulations théoriques très poussées. Les premières ont besoin d'un financement continu dans le temps, les secondes des grands temps de calcul. L'expérience montre qu'obtenir des financements adéquats pour soutenir les expériences de laboratoire dans la durée est compliqué, justement car elles sont souvent à cheval sur différents Instituts (INSU, INC, INP) du CNRS car dernièrement la tendance (nationale et européenne) est au soutien de projets qui se déroulent sur des temps courts (3-5 ans) par rapport à la vie d'une « machine » de laboratoire. Côté simulations théoriques, les progrès dans les capacités de

calcul et les développements théoriques nous permettront d'étudier les processus du collapse du gaz vers l'étoile et son disque, ainsi que de l'évolution chimique, dans un niveau de détails impossible auparavant, ce qui nous permettra de mieux comprendre l'histoire chimique des systèmes planétaires en formation et, par conséquent, l'héritage cosmique du système solaire.

Enfin, la collaboration interdisciplinaire avec les experts numériques mérite probablement quelques explications supplémentaires. Les simulations numériques sont évidemment de toute première importance pour comprendre l'évolution de la matière, depuis son état initial de « grumeau de gaz+poussière diffuse » dans un nuage moléculaire jusqu'à un système planétaire final : plus les simulations se veulent réalistes, plus elles requièrent l'inclusion de plus en plus d'effets physiques/chimiques et d'avantage de résolution, et sont donc coûteuses en termes de temps de calcul. Mais les simulations numériques sont aussi un moyen très puissant, et même unique dans certains cas, pour étudier les processus chimiques dans les conditions interstellaires. Comme dans le cas précédent, plus les simulations sont précises, plus elles sont gourmandes en temps de calcul, d'où la nécessité de la collaboration avec des experts de *High Performing Computing* (HPC).

Pour résumer, la compréhension de l'héritage interstellaire chimique et cinétique de la formation planétaire a besoin d'interdisciplinarité, notamment la collaboration entre chercheurs de différents Instituts du CNRS: l'INSU, l'INC et l'INP ainsi que l'INS2I. Ces collaborations peuvent et doivent être encouragées aussi bien en termes de financements spécifiques prolongés dans le temps, qu'en termes de soutien aux carrières des chercheurs et des ITAs et aux thèses en cotutelles, comme décrit aussi ailleurs dans ce document. Nous insistons encore une fois sur la nécessité de la continuité dans le temps du soutien, car l'interdisciplinarité est un pont fragile.

## FORMATION PLANÉTAIRE ET PROPRIÉTÉS DES PLANÈTES RÉSULTANTES - PLANÉTOLOGIE COMPARÉE

La compréhension de la formation des planètes et des propriétés qui en résultent nécessite une collaboration étroite entre les disciplines permettant de décrire et d'évaluer les processus à l'origine :

- de leur composition chimique;
- des assemblages minéralogiques qui se construisent à partir de cette composition suivant les conditions de pression, de température et de dynamique interne;
- des propriétés physiques (mécaniques et électromagnétiques) qui résultent de cette structure et qui gouvernent les réponses des corps aux sollicitations extérieures (p.e. effets de marée, champs induits).

Il s'agit d'un chantier scientifique extrêmement vaste, qui

concerne les processus de formation de la matière condensée et de son évolution au sein du système solaire. Parmi ceux-ci, accréation et différenciation planétaire fournissent des contraintes fortes sur la dynamique et l'évolution thermique des corps et de leurs enveloppes externes, telles qu'abordées dans d'autres thèmes de cet atelier de prospective.

Une telle ambition scientifique ne peut être envisagée que par l'élargissement des compétences traditionnelles en astronomie et en sciences de la Terre et de l'Univers vers des disciplines de sciences fondamentales permettant de traiter les problèmes physico-chimiques complexes associés, par exemple, aux processus d'évaporation/condensation ou d'accréation, ou aux conditions extrêmes de pression et de température. Les corps planétaires ayant des caractéristiques macroscopiques communes, mais plus ou moins évoluées, par exemple en termes de différenciation, une approche de planétologie comparée est indispensable. Elle doit réussir à combiner les connaissances apportées par les missions d'exploration planétaire avec celles acquises pour la planète Terre, en particulier la Terre primitive, et se donner les moyens théoriques et expérimentaux permettant d'extrapoler les connaissances vers les systèmes extrasolaires.

Les points de départ indispensables à ces recherches sont l'observation et l'analyse des témoins les plus anciens disponibles (météorites) et l'état actuel de corps ayant suivi des évolutions différentes (planètes et leurs satellites).

Les conditions et la chronologie de formation du système solaire peuvent être ainsi comprises et quantifiées grâce à la cosmochimie, principalement via l'étude des météorites. Si cette discipline applique les outils classiques de la géologie et de la géochimie, elle permet d'obtenir des informations dans des champs aussi variés que l'astrophysique nucléaire, la chimie du milieu interstellaire et l'évolution chimique de la galaxie. L'étude des météorites est donc interdisciplinaire par nature et la cosmochimie se situe clairement à l'interface entre les sciences de la Terre et l'astrophysique. De nouveaux progrès dans la caractérisation et la compréhension des météorites primitives ou différenciées verront aussi le jour via des collaborations avec la science des matériaux, la thermodynamique des processus irréversibles et la chimie organique, sans oublier bien sûr l'apport de l'expérimentation. Et c'est forte de ces collaborations que la cosmochimie, et ses contraintes minéralogiques et géochimiques, apportera un écot nouveau aux observations récentes des disques protoplanétaires et leur modélisation.

D'autre part, la vaste gamme des outils géophysiques d'imagerie, de télédétection, géodésie, sismologie, gravimétrie et magnétisme, permettent d'établir un diagnostic de la structure actuelle des intérieurs planétaires et de l'interpréter en termes de composition, de conditions thermodynamiques et de processus dynamiques, mais uniquement si ces observations, effectuées à distance ou en surface des corps,

peuvent être interprétées de manière pertinente pour modéliser leurs structures profondes. Cette étape requiert des théories et des techniques mathématiques et physiques, ainsi que des expériences de laboratoire à haute pression, pour lesquelles des sections du CNRS de mathématique, physique et chimie peuvent apporter des savoir-faire spécifiques et très bénéfiques aux communautés des sciences de la Terre et de l'Univers. Il est donc souhaitable que les différentes sections du CNRS soient ouvertes à des candidatures, soit sur des thématiques qui leurs sont « exotiques », soit sur des compétences techniques qui leur ouvrent des perspectives d'avenir en analyse, expérimentation ou modélisation.

### RELATIONS STRUCTURE INTERNE – SURFACE-ATMOSPHÈRE ; L'ÉVOLUTION DE LA TERRE PRIMITIVE

La compréhension de la structure interne des planètes telluriques et de leur couplage avec les atmosphères est une thématique de grand potentiel scientifique et nécessitant une forte interdisciplinarité. La découverte des exoplanètes et de leur diversité a notamment ouvert un champ nouveau et extrêmement riche en questions à la frontière de plusieurs disciplines qui sont actuellement alimentées par une activité conséquente d'un point de vue observationnel, expérimentale et théorique.

La structure interne des planètes telluriques reste très mal déterminée malgré la découverte de plusieurs planètes de type terrestre de taille variée, les Super-Terres. Les premiers sismomètres ont été déployés sur Mars pour démarrer un sondage de sa structure interne mais des séismes importants seront nécessaires pour déterminer l'interface noyau manteau. Le domaine de pression et de température atteint au cœur des Super-Terres nécessite le développement de nouvelles équations d'état qui ne peuvent être obtenues qu'en couplant les méthodes de dynamique moléculaire quantique validées par des expériences de laboratoire effectuées par chocs. Ces nouvelles équations d'état permettent notamment une meilleure contrainte sur la composition de ces Super-Terres et sur les profils de température pour leurs intérieurs. Ces données sont indispensables pour calculer à terme leur évolution et les effets de surface attendants. L'exploration des diagrammes de phases dans ces conditions extrêmes peut aussi se faire le long de trajectoires isentropiques, aujourd'hui accessibles par profilage d'impulsions laser longues (quelques dizaines de nanosecondes). Cette thématique se développe via des recherches interdisciplinaires impliquant des laboratoires de l'INP, des sciences de la Terre et de planétologie/astrophysique à l'INSU. Le CEA est impliqué notamment pour l'exploitation du laser méga-Joules couplé à la source X-PETAL. Il est à noter que le LULI, école Polytechnique, souhaite créer un GDR sur ce sujet. Nous recommandons à l'INSU d'être proactif pour être présent sur ce thème où l'INP s'est positionné, un lien fort INP-INSU doit être concrétisé.

La structure interne et l'atmosphère primitive d'une planète tellurique sont interconnectées. Aux premiers instants, la présence d'un océan magmatique et sa cristallisation sont considérées comme l'évolution naturelle des planètes telluriques, et une étape importante de la différenciation planétaire, à l'origine de la ségrégation d'un noyau métallique, d'un manteau constitués d'oxydes, et d'une atmosphère primitive. Cette étape est le résultat d'un fort dégazage qui peut aussi s'accomplir de manière tardive permettant ainsi de constituer une atmosphère survivant aux vents stellaires des étoiles jeunes. La structure interne des planètes telluriques influence également l'évolution atmosphérique à long terme par son contrôle sur le dégazage volcanique et les échanges chimiques croûte-atmosphère. Ces études pour la Terre primitive et la formation de sa lithosphère ont été l'objet de nombreux efforts ces dernières années. Il existe actuellement un fort potentiel pour les généraliser aux atmosphères primitives des exoplanètes. Celles-ci commencent à être caractérisées (voir les récents résultats avec ESPRESSO/VLT), observations qui vont se généraliser dans le futur (SPIRou/CFHT; JWST, ARIEL, HIRES/ELT). Sur cette thématique un lien interdisciplinaire fort existe au sein de l'INSU entre sciences de la Terre et (exo)planétologie, il doit continuer à être encouragées. Cette thématique nécessite également des liens avec la physique des gaz chauds (INSIS). Les équipes de la communauté « combustion » (tuyère gaz chaud) possèdent des compétences clefs pour comprendre la physique des atmosphères surchauffées. Pour cette dernière thématique, il s'agit cependant d'une communauté limitée en nombre et très impliquée dans une recherche appliquée sur contrat. Une meilleure implication nécessiterait la mise en place de programmes incitatifs de la part de l'INSU pour encourager la participation de ces acteurs sur ce thème.

Les conditions régnant sur la Terre primitive sont sujet à beaucoup d'incertitudes, notamment concernant la température et la composition des océans primitifs, la différenciation de la Terre interne et l'initiation de la tectonique des plaques, l'émergence des premiers continents, et les premiers pas de la biosphère. Des incertitudes existent aussi sur la composition de son atmosphère et sur les mécanismes biotiques ou abiotiques qui ont guidé son évolution chimique et climatique sur le long terme. Dans ce contexte, l'étude de l'évolution de la Terre primitive et son atmosphère sur le long terme est un domaine qui rentre directement en résonance avec la caractérisation de la diversité des atmosphères des exoplanètes de type tellurique. Ces deux objectifs scientifiques vont s'alimenter l'un l'autre dans les prochaines années avec, notamment une meilleure caractérisation des atmosphères des planètes telluriques et des conditions de la Terre primitive. Cette thématique est bien sûr très liée au sujet du défi 2 et sera approfondi dans celui-ci, notamment pour la partie bio-signature. Elle nécessite toutefois de renforcer les interactions internes à l'INSU (sciences de la Terre, océan et atmosphère et astrophysique) notamment pour la caractérisation de la Terre

primitive, son évolution sur le long terme et l'influence des processus biotiques et abiotiques sur l'évolution de l'atmosphère, l'océan, et le climat.

Pour toutes ces thématiques, ne pouvant être abordées par une approche purement disciplinaire, il serait intéressant de s'inspirer de ce qui fait au sein du Tokyo Institute of Technology réunissant des chercheurs de différentes disciplines sur une question transdisciplinaire.

## 2. Recommandations

### FINANCEMENT DE LA RECHERCHE INTERDISCIPLINAIRE

Nous commençons par remarquer que l'interdisciplinarité n'est pas un but en soi ; c'est un outil pour atteindre certains objectifs scientifiques. Ceci implique une approche *bottom-up*, avec des structures souples qui peuvent accompagner le développement d'une recherche interdisciplinaire proposée, au lieu d'une approche *top-down*, où l'on cherche à imposer le travail interdisciplinaire par le biais du fléchage en amont des financements.

Les programmes nationaux des domaines AA & TS de l'INSU sont à prendre en exemple pour leur action dans la durée. Les périmètres des différents programmes sont convenables et couvrent toutes les disciplines qui ont un rôle dans l'étude de l'origine des planètes. Il n'est pas opportun de multiplier les programmes nationaux ; rassembler différentes communautés au sein d'un même programme est bénéfique à leur interaction, comme on l'a vu dans le cas du PNP. Attention cependant de ne pas créer des PN avec une couverture thématique trop grande, au risque de perdre alors la notion de communauté. S'il y a un manque au niveau des programmes, ceci concerne un éventuel programme sur l'origine de la vie, un sujet qui n'est pas financièrement couvert par la Société française d'exobiologie depuis la fin du programme EPOV. L'INSU pourrait se faire promoteur de la création d'un tel programme, mais celui-ci devrait être principalement un programme de l'INSB, avec une participation minoritaire de l'INSU et de l'INC et, éventuellement, de l'INEE.

Pour accompagner le développement des recherches interdisciplinaires, les programmes nationaux doivent rester souples par rapport à leurs priorités affichées et rester ouverts aux projets proposés par des chercheurs extérieurs aux domaines de l'INSU ou aux instituts du CNRS qui les financent. Cette ouverture doit être fortement affichée afin d'attirer les autres communautés. S'il y a un manque de compétences pour évaluer ces projets au sein du CS d'un programme, le recours aux rapporteurs externes devrait être systématique. Si une forte pression devait se créer sur un programme provenant d'autres domaines/instituts, il serait opportun que ces derniers apportent aussi un complément de financement au programme, à l'instar du domaine TS de l'INSU pour le PNP ou de l'INP et INC pour le PCMI. Au moins ces deux programmes ont vocation à devenir des véritables programmes inter-domaine ou inter-institut. En particulier, pour le défi qui fait l'objet de cet atelier, la participation du domaine Océan- Atmosphère de l'INSU est fortement souhaitée, car ses compétences sont précieuses pour la caractérisation des planètes extrasolaires et la mo-

délisation de leur environnement à partir des données observationnelles. L'utilisation des GCMs (Global Circulation Models) est de plus en plus courante en planétologie et exoplanétologie et elle relève du domaine OA.

Il est nécessaire que les projets interdisciplinaires proposés à plusieurs programmes nationaux soient évalués pertinemment et conjointement par les Programmes concernés. Pour ce faire, il est souhaitable que les CS des programmes se concertent, soit par une réunion commune (qui peut être faite en visioconférence en réunissant seulement les membres des différents CS experts dans le sujet du projet) comme il est actuellement fait par le PNP et PNPS pour les demandes concernant les exoplanètes et disques protoplanétaires, soit par l'inclusion dans chaque CS d'un représentant des CS des autres programmes, expert des sujets à l'interface, comme c'est le cas entre le PNPS et le PCMI. Cette concertation forte entre CS des programmes devrait aussi concerner l'exercice de prospective, afin que les projets interdisciplinaires reçoivent un appui cohérent des différentes disciplines.

En accord avec le constat que les projets interdisciplinaires ont souvent un démarrage lent et peu coûteux, essentiellement limité à des prises de contact entre personnes, il ne faut pas oublier, parmi les catégories des projets finançables par les programmes nationaux, une catégorie « projets en incubation » à quelques milliers d'euros par an pour une durée qui peut aller jusqu'à au moins trois ans. Ces projets peuvent ensuite monter en puissance, devenir « réseaux » ou même « défis transverses » ou « projets systémiques », voire être financés par l'ANR ou l'ERC ou MSCA-ITN. Le niveau intermédiaire de financement, entre le niveau Programme National (~5-30K€) et le niveau ANR (0,5M€) pourrait être couvert par la Mission pour les Initiatives transverses et interdisciplinaires (MITI) du CNRS mais, en cohérence avec l'approche *bottom-up* à l'interdisciplinarité que nous défendons, il faudrait que celle-ci ait un programme blanc et pas seulement des appels à projet sur des sujets fléchés.

Les GdRs peuvent aussi jouer un rôle très important pour le développement de l'interdisciplinarité, car ils permettent la création de réseaux et de langages communs. Par leur durée limitée, ils doivent être seulement considérés comme une étape intermédiaire dans la construction d'un projet interdisciplinaire. En aucun cas on ne peut penser substituer les programmes nationaux par des GdRs.

Quand ils existent, il faut enlever les verrous qui, dans la pratique, ne permettent pas à un chercheur ou à un laboratoire qui relève d'un domaine ou d'un institut de recevoir un

financement d'un autre domaine ou institut. Par exemple, il ne faudrait pas y avoir des réticences de l'INC pour financer une expérience de chimie dans un laboratoire d'astrophysique ou pour l'INSU de financer une expérience qui, par présence de compétences et infrastructures, s'effectue dans un laboratoire de l'INC.

Concernant les thèses interdisciplinaires, il serait utile que le chercheur promoteur de sujet puisse s'adresser à plus d'une École doctorale (ED). La possibilité de rattachement des chercheurs interdisciplinaires à plusieurs EDs aiderait dans cette démarche. Des sujets de thèse cofinancés par deux EDs, comme cela se fait déjà à Marseille-Aix en Provence, donneraient un label d'interdisciplinarité tout à l'avantage du doctorant, en plus du partage des coûts. L'implémentation de ces recommandations ne relève clairement pas du CNRS, mais le CNRS peut jouer un rôle d'impulsion vers les Universités (par exemple par le financement de contrats doctoraux supplémentaires pour des binômes sujet/étudiant sélectionnés par 2 EDs). L'apparition des *graduate schools* peut aussi favoriser cette démarche en offrant un bassin de recrutement d'étudiants plus large et un affichage de sujets interdisciplinaires hors-ED.

## RECRUTEMENTS ET CARRIÈRES

Constat est fait que les Comités nationaux du CNRS sont réticents à recruter/promouvoir des chercheurs pour des unités en dehors de leurs sections. Ceci est un obstacle fort pour le recrutement et l'avancement de carrière des chercheurs interdisciplinaires (et donc pour l'attractivité des thèses interdisciplinaires). Pareillement, l'évaluation d'un chercheur dont une partie de l'activité s'exerce dans un domaine extérieur à celui de la section d'appartenance est souvent pénalisée. Par conséquent, nous recommandons au CNRS de rappeler aux sections l'importance stratégique de l'interdisciplinarité. La nomination d'un responsable pour l'interdisciplinarité dans chaque CN, qui veillerait à ce que les dossiers interdisciplinaires soient correctement traités, donnerait un signal fort en ce sens.

Même avec toute la bonne volonté, il reste néanmoins le risque d'un manque de compétences dans un CN donné pour l'évaluation d'un chercheur interdisciplinaire. Pour pallier ce problème, le recours à un rapporteur externe est souhaité. Une méthode encore plus efficace pour l'examen des candidats interdisciplinaires serait la double évaluation par les sections des disciplines concernées. La double évaluation est possible déjà aujourd'hui, mais dans la pratique, les sections donnent des avis disjoints, sans concertation, avec un effet nul. On propose que le CNRS affecte un certain nombre de postes pour l'interdisciplinarité, sans fléchage

de thématique, que les sections attribueraient après s'être concertées. Dans la pratique, les chercheurs candidats à ces postes enverraient leur dossier aux sections des disciplines concernées. L'évaluation se ferait en deux étapes. D'abord, chaque section ferait une évaluation séparée, sans prendre une décision finale. Ensuite, les bureaux des différentes sections siègeraient ensemble et, en confrontant leurs évaluations respectives, décideraient à qui attribuer les postes à pourvoir. Ce schéma s'appliquerait aussi bien pour les recrutements que pour les avancements de carrière.

Concernant les ITAs, dans un contexte national difficile, avec de moins en moins de postes à pourvoir, nous soulignons que leur recrutement pour des expériences de laboratoire de chimie ou de physique dans des unités d'astrophysique devrait être une priorité. Ces expériences sont souvent au cœur de l'interdisciplinarité entre physique ou chimie et planétologie. Sans le soutien de ces personnels, ces expériences seraient remises en question. Il faut souligner que ces ITAs travaillent souvent seuls dans la gestion des appareils de leur laboratoire. Comme ils n'encadrent pas, ils ne sont pas éligibles à certaines primes (données en fonction du nombre de personnes encadrées) et leur dossier en est moins compétitif. Par conséquent, nous recommandons que pour les primes et les avancements des carrières, on tienne davantage compte de la taille du parc analytique géré (nombre d'appareils et/ou valeur des appareils) et pas seulement les aspects RH.

## QUELQUES RETOURS D'EXPÉRIENCE SUR L'INTERDISCIPLINARITÉ

L'atelier a démarré par une série d'interventions faisant l'état d'expériences sur la promotion de l'interdisciplinarité en formation planétaire. Certaines interventions étaient au nom de structures, tel que l'ancien programme interdisciplinaire OPV/EPOV (Origines des Planètes et de la Vie / Environnements Planétaires et Origines de la Vie) qui a existé de 2006 à 2011, le Programme national de planétologie, les projets interdisciplinaires « Origines et conditions d'apparition de la Vie » et « Origins of Life » récemment financés par l'Université Paris Sciences et Lettres et de l'Université de Grenoble Alpes; d'autres interventions étaient à titre plus personnel.

Il émerge de toutes ces interventions une vision assez cohérente de la façon dont la recherche interdisciplinaire se met en place. Les financements sont importants mais ils ne

sont pas le verrou principal. L'interdisciplinarité demande un investissement personnel pour apprendre le langage et la culture de « l'autre discipline », la recherche d'un partenaire dans l'autre domaine ayant des intérêts proches, la mise en place d'un dialogue qui s'intensifie dans le temps. C'est un processus lent, qui prend des années, favorisé par des écoles ou des workshops, lieux de rencontres communs. Il ne nécessite pas beaucoup de fonds au départ, car initialement il se réduit essentiellement à du networking, mais qui peut monter en puissance et demander ensuite des financements considérables. Par conséquent, l'interdisciplinarité se développe principalement dans un processus *bottom-up* et nécessite des structures capables de favoriser et accompagner sa germination. En revanche, inciter au niveau national des communautés à travailler ensemble par un processus *top-down*, avec la mise à disposition d'une grande quantité de financements à pourvoir, n'est pas forcément très efficace et souvent aboutit d'abord à la réalisation d'une collection multidisciplinaire de travaux mono disciplinaires ; si cette action incitative n'est pas conduite dans la durée la vraie recherche interdisciplinaire a du mal à se développer. Le cas de OPV/EPOV apparaît donc comme un exemple à ne pas suivre : le temps de monter en puissance et voir des vrais projets interdisciplinaires surgir, ce programme a subi d'abord une réduction de ses crédits, puis il a été arrêté au bout de seulement 5 ans. A l'inverse, le Programme National de Planétologie, avec son histoire pluri-décennale, a réussi une vraie synergie entre les communautés de la planétologie et de la cosmochimie françaises qui nous est enviée à l'étranger et, depuis la fusion avec le programme SEDIT du domaine TS en 2010, a su fédérer les communautés qui travaillent sur la structure interne de la Terre et sur les structures d'autres planètes, exoplanètes et satellites naturels. Un autre exemple est fourni par le Programme National Physique et Chimie du Milieu Interstellaire, dont le but a été depuis son début l'interdisciplinarité : sa pérennisation a permis, par exemple, des collaborations très étroites entre chimistes, physiciens et astrophysiciens qui font de l'astrochimie française un acteur mondiale majeur.

Un autre constat concerne la formation des doctorants à l'interdisciplinarité. Tout d'abord, il est difficile d'attirer vers une thèse interdisciplinaire des étudiants ayant forcément reçu une formation mono-disciplinaire : souvent ils ne comprennent pas l'intérêt et les objectifs du projet, mais seulement les aspects techniques de leur discipline. Le rattachement des chercheurs à une seule École Doctorale rend difficile d'atteindre un vivier de doctorants potentiels provenant d'un autre domaine. Les Écoles Doctorales sont aussi souvent réticentes à financer une thèse dont le sujet n'est pas complètement inscrit dans leurs domaines respectifs. De plus, une thèse multidisciplinaire est souvent un saut dans l'inconnu, avec retour incertain, et peut donc mettre en péril le futur de l'étudiant. La maîtrise de disciplines complémentaires risque d'être difficile à atteindre dans la durée typique d'une thèse en 3 ans. Et, même si la thèse a du succès, si sa valeur *in fine* n'est pas complètement recon-

nue par le comité d'au moins une discipline, les chances de recrutement du jeune docteur peuvent être affaiblies. Cependant une thèse ou un post-doc en co-direction entre deux laboratoires peut permettre de fortement motiver les équipes sur un sujet à l'interface, permettant un travail commun.

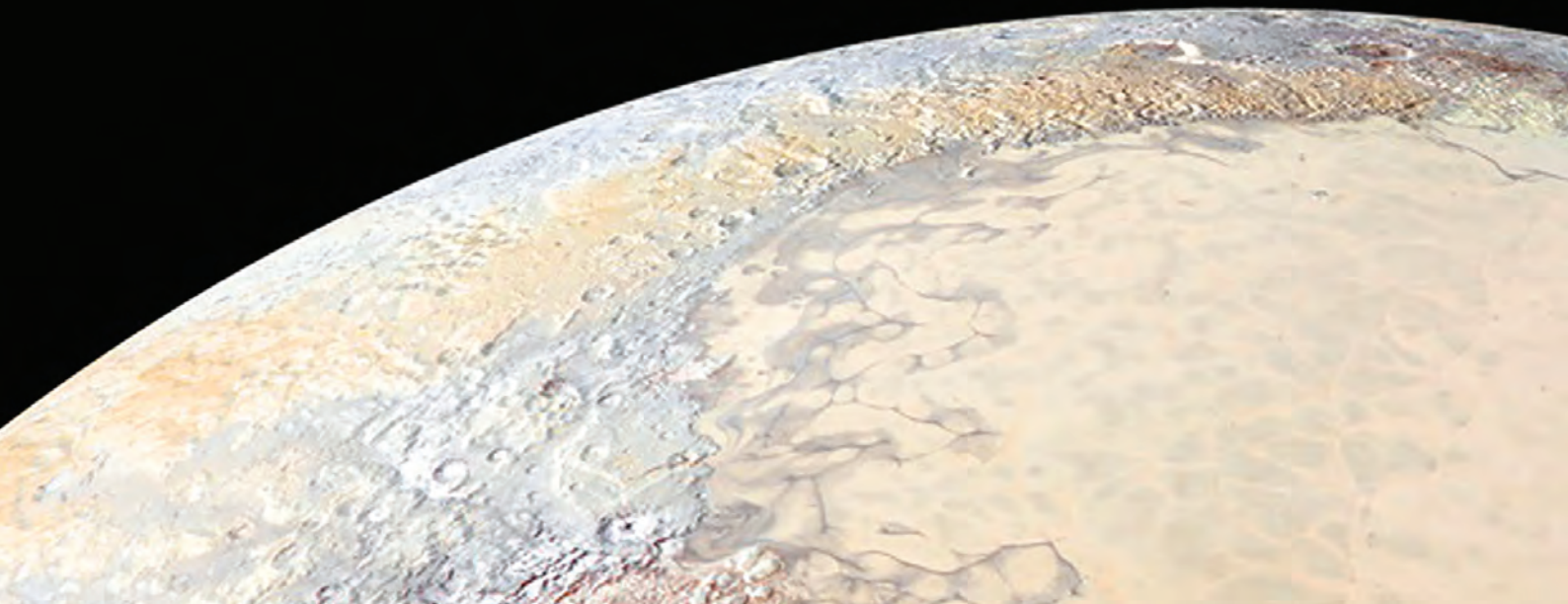
Un troisième constat concerne les carrières. Le personnel technique qui s'investit sur un projet interdisciplinaire risque de se retrouver isolé dans son laboratoire car ses problématiques de travail peuvent être différentes et non partagées par les collègues. Les carrières de ces ITAs sont souvent pénalisées car leur travail est moins central pour le laboratoire d'appartenance et il est donc difficile pour les directeurs de les soutenir en priorité. Les carrières des chercheurs interdisciplinaires peuvent aussi souffrir d'un manque de reconnaissance de la part de leur section d'appartenance, en absence d'une véritable évaluation interdisciplinaire ou d'une double évaluation par les comités des disciplines concernées.

Des verrous bureaucratiques dus à un certain cantonnement des Instituts (voir même de certains domaines de l'INSU) sont parfois ressentis comme des obstacles au développement de la recherche interdisciplinaire. Dans certains cas, les sources de financement ne sont accessibles qu'aux chercheurs ayant une affiliation à l'Institut qui les pourvoit. Un chercheur qui propose une recherche dans un domaine qui ne lui est pas propre n'est donc pas recevable. Ce verrou peut être contourné en s'associant à un chercheur avec la bonne affiliation, qui porte la demande, mais il reste néanmoins dérangeant.

# Défi 2

## Signature d'habitabilité des planètes et exoplanètes

**Comité d'organisation scientifique :** Nathalie Carrasco, Benjamin Charnay, Grégoire Danger, Magali Deleuil, Xavier Delfosse, Muriel Gargaud, Valery Lainey, Louis Le Sergeant d'Hendecourt, Stéphane Mazevet, Valérie Michotey, Olivier Mousis, Pascal Rannou, Cyril Szopa, Nicolas Thouveny, Frances Westall, Philippe Zarka.



# 1. Des sujets porteurs et demandeur d'interdisciplinarité

## **DISTRIBUTION, FORMATION ET COMPOSITION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE : EXOGÈNE (GÉNÉRIQUE, PROCESSUS EXTRATERRESTRES) VS ENDOGÈNE (RESTREINTE, DÉPENDANTE DE L'ENVIRONNEMENT PLANÉTAIRE)**

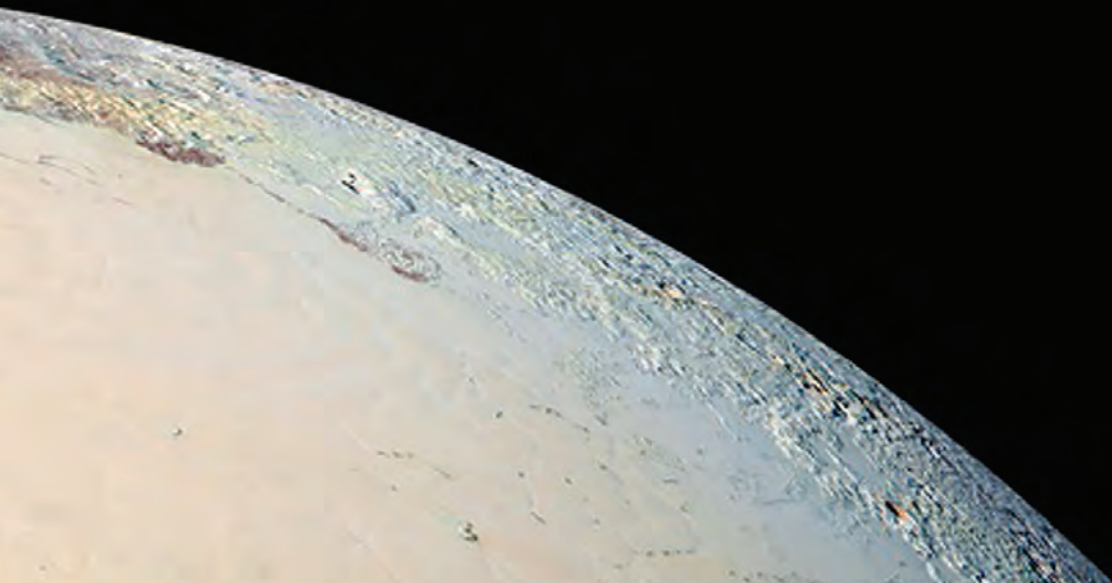
La chimie du vivant sur la Terre, seul exemple de vie connu à ce jour, est basée sur la chimie du carbone, la présence d'eau liquide et la disponibilité d'énergie libre nécessaire à l'auto-organisation. La chimie organique est donc l'un des points d'entrée incontournables pour l'étude des processus ayant pu mener à cette auto-organisation. Deux réservoirs de matière organique peuvent être identifiés. L'étude des météorites est d'une grande aide pour comprendre la nature de la chimie organique exogène. L'expérience de Miller et ses dérivés permettent aussi de montrer comment l'atmosphère d'une planète tellurique a pu s'enrichir en matière organique, endogène, la combinaison des deux n'étant pas à priori exclue.

L'interdisciplinarité liée à la chimie du vivant sur Terre tient avant tout à l'interdisciplinarité imposée par la diversité des environnements où est observée cette matière organique. Ainsi l'astrochimie et ses méthodes de spectroscopie sophistiquées en radioastronomie, couplées aux modélisations de transfert radiatif dans des objets comme les protoétoiles de faible masse, permet d'affirmer l'universalité de cette astrochimie organique et de cartographier la présence de molécules « complexes » supposées jouer un rôle dans la chimie prébiotique. La cosmochimie des météorites, avec toute une palette de méthodes analytiques relevant de la physique (infrarouge, Raman, analyses isotopiques) et de la chimie analytique (GC-MS, VHRMS) permettent la détection de très nombreuses molécules considérées comme

des briques du vivant qui sont aussi mises en évidence par l'analyse de résidus organiques en laboratoire, souvent issus de glaces irradiées. Ces analyses sont très interdisciplinaires et généralement transitent de l'astrochimie/cosmochimie vers des laboratoires de l'INC (chimie analytique) et utilisent aussi souvent les plateformes analytiques ou les grands instruments comme le rayonnement synchrotron à SOLEIL ou à l'ESRF ou encore le TGE FT-ICR. La communauté est remarquablement organisée dans ce domaine mais comme souvent un peu parcellaire et la coordination pourrait être renforcée.

## **PRÉBIOTICITÉ ET PRIMO-HABITABILITÉ : CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES POUR L'ÉMERGENCE D'UNE CHIMIE PRÉBIOTIQUE ET SA PRIMO-ÉVOLUTION**

La caractérisation des environnements abiotiques montre la présence d'une matière organique complexe par la très grande diversité moléculaire présente. D'un autre côté, la matière organique des systèmes issus du vivant a une composition moléculaire nettement moins compliquée mais présente un degré d'organisation plus complexe. Une question fondamentale en exobiologie est donc de comprendre quels environnements peuvent permettre d'obtenir une sélection, analogue à la sélection naturelle, permettant le passage de matière abiotique très diverse moléculairement vers des systèmes prébiotiques ou biochimiques impliquant une plus faible diversité moléculaire mais aussi une plus importante organisation, voire une certaine fonctionnalité. Ainsi, il a été cherché à élucider le lien entre la formation de matière organique dans le milieu extraterrestre (interstellaire, disques, comètes, astéroïdes) et sa contribution à l'apparition du vivant suivant une vision de l'émer-



NASA, JHUAPL and SwRI

gence du vivant basée sur les principes d'auto-organisation et d'autocatalyse. Il résulte de cette approche que c'est la cinétique des réactions des espèces organiques plutôt que la nature même de ces espèces qui est dans les deux cas déterminante. Des conditions d'émergence de processus chimiques analogues à la sélection naturelle sont également proposés. La possibilité de tester *in vitro* ce type d'hypothèses a été brièvement suggérée.

Par ailleurs, de plus en plus de recherches expérimentales montrent des voies analogues à la biologie mais fonctionnant sans enzymes et utilisant de simples catalyseurs inorganiques. De tels processus pourraient avoir été présents sur la Terre primitive. Il est important d'être clair avec les définitions. En particulier, la définition d'une « chimie des systèmes » peut être floue. Un autre terme important est la notion « hors équilibre ». Dans un organisme vivant, les voies biochimiques doivent travailler ensemble et simultanément ou en séquence. Cela signifie que les contraintes sur la chimie non enzymatique d'une réaction ou d'une voie deviennent pertinentes pour les autres, car tous les sous-systèmes restent couplés cinétiquement. La même chose doit se produire dans la chimie prébiotique. Une question importante concerne la source d'énergie, avec en compétition une source de faible entropie comme des photons visible-UV (donc en surface) ou une énergie tirée des gradients oxydo-réduction ou autres dans les sources hydrothermales.

De plus en plus de scénarios « origines de la vie » font appel aux réactions de molécules biologiques sur des surfaces minérales. On a même pu proposer une hypothèse de « continuité bio-géochimique » postulant que des étapes cruciales du métabolisme actuel reproduisent des réseaux de réac-

tions établis sur ces surfaces, la catalyse hétérogène ayant joué le rôle qui, plus tard, a été dévolu à la catalyse enzymatique.

### **CARACTÉRISATION DE LA TERRE PRIMITIVE ET CONDITIONS D'HABITABILITÉ À L'ÉMERGENCE : RÔLE DE L'EAU, SOURCES D'ÉNERGIE LIBRES, STRUCTURE INTERNE ET ATMOSPHÈRE, CHAMP MAGNÉTIQUE, STABILITÉ DYNAMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE, IDENTIFICATION DES PLUS ANCIENNES TRACES DE VIE, EXTRÊMOPHILES**

L'étude de la Terre primitive et de Mars primitive apporte des données quantitatives sur l'habitabilité d'une planète ainsi que sur les premiers organismes chimio-lithoautotrophes. La plus grande part de cette vie microbienne existe en subsurface et repose sur des métabolismes anaérobies chimio-lithoautotrophes (indépendants de la photosynthèse). Les systèmes hydrothermaux d'origine magmatique ou liés à la serpentinisation constituent des « fenêtres ouvertes » sur la vie subsurface qui facilitent l'étude de tels écosystèmes. Situés à l'interface entre l'océan (ou l'atmosphère) et la subsurface ce sont des environnements particuliers; bien que très intéressants comme modèles d'étude, ils ne représentent qu'une vision limitée des processus géobiologiques de la biosphère souterraine. Il est donc important d'inclure également d'autres habitats souterrains ou les conditions environnementales (pression, température) posent de véritables défis à la vie notamment en termes de source d'énergie disponible. Ces trois environnements, Terre souterraine, sources hydrothermales et Mars primitives présentent trois prototypes de développement de vie sans photosynthèse ni oxygène. Les enjeux portent sur la compréhension des

écosystèmes chimiolithotrophes contemporains, l'extrapolation vers des écosystèmes primitifs pour Mars et la Terre et leurs effets à l'échelle planétaire pour ce qui est de la recherche de vie et des conditions d'habitabilité.

Il s'agit donc d'une question très interdisciplinaire car elle demande :

- de caractériser l'environnement Terre et Mars primitives, leurs conditions P,T, atmosphères, ainsi que la caractérisation isotopique  
—> géochimie, géophysique, planétologie
- de caractériser les écosystèmes chimiolithotrophes, par divers approches méthodologiques (métagénomique, cultures, biogéochimie) pour les contemporains et extension vers les organismes ancestraux tels LUCA  
—> biologie
- d'identifier des biosignatures (ou signatures agnostiques) pour Mars primitive et relevés isotopiques pour conditions  
—> retour d'échantillons —> spatial
- d'extrapoler pour les autres environnements : Encelade, Europe et exoplanètes  
—> astro

### **CARACTÉRISER L'HABITABILITÉ D'UNE PLANÈTE, D'UNE LUNE, OU D'UNE EXOPLANÈTE : RECHERCHE/DÉFINITION DE BIOSIGNATURES, CRITÈRES D'HABITABILITÉ, DÉTECTION DES PLANÈTES HABITABLES, MÉTHODES DE CARACTÉRISATION PRIMITIVE**

Les quatre critères « classiques » de l'habitabilité (présence d'eau liquide, de sources suffisantes de CHNOPS, d'énergie pour alimenter les réactions métaboliques et de la durée nécessaire à l'éventuelle émergence de la vie), reçoivent un consensus raisonnablement large dans la communauté. Elles doivent être comprises avant tout comme un outil pour identifier et caractériser par l'observation, avec le maximum de détails possibles, des habitats potentiels, ou des « candidats habitats ». Cette caractérisation des candidats habitats est un préalable à la recherche des « habitants » potentiels.

Dans le système solaire lui-même, 60 ans d'exploration planétaire nous ont appris que les critères d'habitabilité peuvent être remplis, sous réserve de plus ample inspection, dans deux types de « candidats habitats » : les habitats de surface, qui se réduisent peu ou prou à la Terre et Mars ; et les habitats profonds, à savoir les océans internes d'un certain nombre de lunes de glace. Si les conditions permettant le maintien des réservoirs d'eau liquide viennent essentiellement de l'irradiation solaire pour les habitats

de surface, elle vient essentiellement des propriétés du diagramme de phase de la glace à haute pression, combinées à la dissipation de marée, pour les habitats profonds des « lunes océans ».

Extrapoler ce constat observationnel à la recherche d'habitats sur/dans les exoplanètes et leurs lunes est une démarche logique, qui aboutit naturellement à la notion désormais classique de « Zone habitable » en ce qui concerne les habitats de surface, et à une stratégie cohérente consistant à focaliser les recherches de la vie sur les exoplanètes au sein de ces Zones habitables et à la surface de planètes de type tellurique. L'extrapolation de la recherche d'éventuels habitats profonds aux exo-lunes semble devoir être un accompagnement logique de cette première démarche lorsque la détection et la caractérisation de ces exo-lunes sera devenue possible, à un horizon décennal ou pluri-décennal. Elle est confortée par l'idée que, si la formation de lunes est un phénomène « universel » accompagnant la formation de planètes géantes (de type Jupiter comme de type Neptune), alors les candidats exo-lunes habitables pourraient bien être plus nombreux que les candidats planètes habitables dans notre voisinage galactique.

Une stratégie cohérente et « complète » de recherche de candidats objets habitables doit donc raisonnablement se décliner, avec peut-être des priorités variant avec le temps et les découvertes, vers trois types de cibles où la caractérisation de l'habitabilité puis la recherche de la vie relèvent de trois types de méthodes totalement différentes, et au potentiel de « preuve scientifique » différent. Du plus fort au plus faible :

- La cible la plus proche de la Terre, Mars, habitat de surface mais peut-être aussi de subsurface potentiel, se prête à l'approche la plus puissante, celle du retour d'échantillons. Cette approche doit réunir les compétences des géologues, minéralogistes, géophysiciens et finalement des géochimistes de laboratoires et tirer profit de leurs puissants moyens analytiques ;
- Les lunes de glace, trop lointaines pour envisager à court terme un retour d'échantillon, requièrent de mobiliser une large panoplie de moyens d'investigation principalement géophysiques pour étudier leur habitabilité. Dans un second temps on pourrait alors concevoir des missions spatiales capables de déposer à leur surface, sur un site préalablement choisi pour sa pertinence exo-biologique, un véritable petit laboratoire d'analyse moléculaire. Un tel laboratoire devra être capable de caractériser une large gamme de molécules, des signatures les plus élémentaires de l'activité de la vie jusqu'aux biomolécules les plus complexes ;
- Enfin, pour les exoplanètes, seule l'observation astrono-

mique peut leur être appliquée, d'où la nécessité pratique de se focaliser sur la recherche de « biosignatures » à leur surface ou dans leurs atmosphères, une approche qui doit s'appuyer sur une réunion d'expertises très larges : physique des atmosphères et surfaces planétaires, sciences du climat et bien sûr spectroscopie et imagerie à très haute résolution, associées aux méthodes les plus avancées de détection d'exoplanètes.

La découverte de plus de 4000 exoplanètes, dont certaines rocheuses, laisse entrevoir la possibilité de rechercher la vie hors du système solaire. Pour autant, la science des exoplanètes reste très exploratoire : les mesures sont difficiles, très restreintes, la plupart du temps limitées aux seuls paramètres fondamentaux accessibles à l'observation astronomique que sont la masse et le rayon. De plus, bien que nombre de ces planètes paraissent présenter des similitudes physiques avec la Terre, leur environnement est totalement différent de celui des planètes du système solaire : synchronisation, orbites planétaires très serrées ou rayonnement stellaire très différent de celui du Soleil, selon le type de l'hôte stellaire de chaque « candidat à l'habitabilité ».

La question de l'habitabilité des lunes glacées paraît apporter un éclairage complémentaire très utile sur cette question d'habitabilité, en élargissant les recherches dans le système solaire, et l'élaboration des méthodes de recherche, aux habitats profonds. Les lunes glacées constituent ainsi un laboratoire intéressant dans notre propre système solaire, pour s'interroger sur une vie éventuelle dans des conditions très différentes de celles de notre planète. Le cas de l'iden-

tification de signatures organiques sur Encelade, et des méthodes déployées ou proposées pour caractériser l'habitabilité d'Europe, illustrent bien la nécessaire mise en œuvre d'un très large spectre de compétences disciplinaires dans lequel les méthodes de la géophysique (peu présentes dans cet atelier) jouent un rôle essentiel aux côtés de la géologie et de la géochimie.

L'analyse de ces différences cas conduit à plusieurs constats :

- le terme de biosignature est peu adapté aux exoplanètes, celui d'indices de vie (biohints) est plus pertinent ;
- la notion d'habitabilité basée sur la seule irradiation de la planète est trop restrictive : le contexte mais également l'historique de la planète depuis sa formation, de même que les éventuelles contributions des sources d'énergie internes (radionucléides et dissipation des marées) doivent être pris en compte si on veut espérer dresser un inventaire exhaustif des lieux favorables à une forme de vie ;
- pour les exoplanètes, la piste la plus solide pour identifier ces sites favorables paraît être d'identifier, dans des familles de planètes données, celles qui présentent des anomalies qu'on ne pourra expliquer autrement que par la vie. Ceci nécessite de bien caractériser de larges échantillons de planètes ;
- les indicateurs utilisés sur Terre ou sur Mars s'avèrent être peu adaptés pour des détections à distance. Les surfaces planétaires restent inaccessibles et les mesures de composés atmosphériques également, pour des planètes de type tellurique. Au mieux, lorsque de telles mesures seront possibles, il sera nécessaire de s'appuyer sur plusieurs indicateurs de présence ou absence de vie, et surtout sur des indicateurs globaux.

Hubert RAGUET / Laboratoire  
de Physique de l'ENS /  
Observatoire de Paris /  
Observatoire Midi-Pyrénées /  
CNRS Photothèque



## 2. Recommandations

**Concernant la distribution, la formation et la composition de la matière organique, l'analyse effectuée lors de l'atelier propose les conclusions suivantes :**

### **Points forts de la communauté :**

- Laboratoires (INSU, INC) développant des expérimentations pour comprendre l'origine et le type de matière organique présent au sein des réservoirs endogène et exogène.
- Laboratoires à la pointe pour le développement de méthodologies analytiques innovantes permettant l'analyse de matrice complexe telle que les échantillons météoritiques.
- Laboratoires à la pointe dans la caractérisation des objets naturels que sont les météorites et implications dans de nombreuses missions spatiales ayant pour objectifs la caractérisation *in situ* de matière organique (Rosetta).
- Modélisation des atmosphères planétaires et modèles climatologiques permettant de simuler les conditions de formation de la matière endogène.

### **Améliorations des points faibles :**

- Développer et renforcer les liens entre les laboratoires qui développent les outils spatiaux et les laboratoires plus strictement expérimentaux (INSU, INC).
- Renforcer les interactions entre instituts en s'appuyant sur la nécessité d'approches interdisciplinaires (planétologie, géologie, astrophysique, chimie analytique, physico-chimie...).

**Concernant la prébiotité et la primo-habitabilité, l'analyse effectuée lors de l'atelier propose les conclusions suivantes :**

### **Points forts de la communauté**

- Approche interdisciplinaire liant l'astrophysique, la géochimie, la chimie et à la biochimie.
- La communauté présente à la fois des approches *top-down* et *bottom-up* de cette problématique.

### **Amélioration des points faibles :**

- On aurait besoin de davantage de biologistes pour mieux interpréter les résultats en termes de processus biochimiques. Ici les communautés ont tendance à agir en ordre dispersé même si ateliers ciblés et colloques existent, il serait intéressant de renforcer cet axe essentiel, probablement par le canal de la mise en place d'un programme national interdisciplinaire bien ciblé sur ces thématiques et qui serait à même de fédérer au mieux les communautés ;

- Il est très difficile de recruter des chercheurs au sein de certaines disciplines du fait de l'aspect interdisciplinaire des recherches et la mauvaise image que peut renvoyer ces thématiques. Le risque d'une perte des savoir-faire et d'approches innovantes est en jeu, notamment au niveau de la chimie prébiotique.

**Concernant la caractérisation de la Terre primitive et les conditions d'habitabilité à l'émergence, l'analyse effectuée lors de l'atelier propose les conclusions suivantes :**

### **Points forts et points faibles de la communauté :**

- Des compétences étendues sur un large spectre au-delà de l'INSU pour ce qui est de la caractérisation des écosystèmes : biologie et INSB – et l'INC, INEE.
- Domaine émergent peu présent à l'INSU et en France. Quelques tentatives à l'international.

### **Amélioration des points faibles :**

- Renforcer les initiatives qui ont émergées sur les sites comme OCAV à PSL qui approche ce problème de manière intégrée avec planétologues et biologistes (peut-être d'autres exemples Bordeaux, Grenoble, Marseille) ;
- Faire la même chose en ce qui concerne l'INC
- Les sites apportent une cohésion planéto-chimie-biologie à leur échelle. En s'appuyant dessus, l'INSU permettrait l'extension de ces projets locaux à l'échelle nationale pour étendre les expertises autour de ce thème, y rattacher des chercheurs qui n'ont pas d'initiative sur leur site, et créer une dynamique intersites.

**Concernant la caractérisation de l'habitabilité d'une planète, d'une lune, ou d'une exoplanète, l'analyse effectuée lors de l'atelier propose les conclusions suivantes :**

### **Points forts et points faibles de la communauté :**

- Une grande force de la communauté française est d'être très impliquée dans les grandes missions spatiales de caractérisation des habitats et ultérieurement de la vie, que ce soit parmi des exoplanètes, sur Mars ou dans les systèmes des planètes géantes, mais aussi dans les grands programmes sol.
- Les données accumulées sur les exoplanètes aident dans un premier temps à comprendre les mécanismes qui conduisent à la formation d'une atmosphère et son évolution, ou ce qui est nécessaire pour qu'une planète possède un environnement habitable. Ces études ont d'ores et déjà commencé grâce au développement d'outils en forts couplages avec la géophysique, la climatologie et la bio-

logie. Elles peuvent également permettre de déterminer les espèces atmosphériques qui pourraient être de bons indicateurs. En parallèle, il convient de préparer le concept d'un instrument suffisamment performant à l'horizon 2050 voire au-delà, pour permettre la mesure de ces différents composés dans l'atmosphère d'une planète rocheuse.

- En ce qui concerne les recherches dans le système solaire, il n'y a aucun doute qu'elles sont structurées par de grandes missions spatiales réalisées dans un cadre Européen ou même plus largement international. Assurer la meilleure participation française possible à ces missions, d'abord au niveau de leur conception scientifique, puis de la réalisation des instrumentations les plus performantes nécessaires, enfin au niveau de l'analyse scientifique des résultats, est la stratégie à poursuivre et à consolider, en s'appuyant sur les liens forts existant entre la communauté et ses laboratoires, le CNES, le CNRS et les Universités.

#### **Amélioration des points faibles :**

Dans ce cadre, créer en amont des missions puis au niveau de l'exploitation scientifique des résultats le cadre interdisciplinaire très large nécessaire, depuis l'astronomie jusqu'à la biologie en passant par les sciences de la terre et du climat et la chimie, sans oublier les sciences de l'ingénieur et de l'information nécessaires à la conception des instruments les plus performants et les plus compétitifs à l'échelle internationale, semble être l'action prioritaire. Le CNRS et en son sein l'INSU ont tous les atouts nécessaires pour relever ce grand défi de la recherche de la vie hors de notre planète.

# Défis

# 3 & 4

Enregistrement  
géologique des crises  
environnementales  
et interactions  
entre crises  
environnementales  
et écosystèmes





Charles GUMIAUX / CNRS Photothèque

**Comité scientifique: Annachiara Bartolini, Pierre-Henri Blard, Julien Bouchez, Yannick Donnadiou, Silvia Gardin, Amaëlle Landais, Jacques Laskar, Jérémy Martin, Guillaume Paris, Emmanuelle Pucéat, Claire Rollion-Bard, Pierre Sans-Jofre, Johann Schnyder, Sylvie Bourquin, Arnaud Brayard, Sylvain Charbonnier, Sébastien Clausen, Sylvie Crasquin, Frédéric Fluteau, Olga Otero, Guillemette Menot, Brigitte Meyer-Berthaud, Jérôme Poulénard, Marc de Rafélis, Emmanuelle Vennin.**

L'enregistrement géologique des crises environnementales (Défi 3) et les interactions entre crises environnementales et écosystèmes (Défi 4) sont intrinsèquement liés. À la suite des réunions des comités scientifiques des deux défis, plusieurs grandes questions identifiées concernaient tout aussi bien le Défi 3 que le Défi 4. Il a ainsi été décidé de traiter ces questions ensemble lors d'une réunion commune des participants aux deux défis. Le présent rapport fait ainsi la synthèse de ces discussions communes aux deux défis.

La communauté « paléo » en France est active et diverse. Elle travaille sur des périodes et des échelles de temps très variées, depuis l'environnement de la Terre Primitive jusqu'à l'Holocène, en passant par le Phanérozoïque et le Précambrien. Elle regroupe des paléocéanographes, des sédimentologues, des structuralistes, des volcanologues, des glaciologues, des géochronologues, des modélisateurs, des géochimistes, des paléontologues ou encore des palynologues. Elle inclut aussi des chercheurs étudiant les systèmes actuels et faisant le lien avec le fonctionnement de ces systèmes dans le passé. Cette communauté réunit ainsi des chercheurs rattachés à différents domaines de l'INSU et à des composantes de l'INEE (Terre solide, Surface et Interfaces Continentales, Biodiversité, Évolution et adaptations biologiques: des macromolécules aux communautés) et de fait s'inscrit déjà dans des démarches et des réflexions inter-domaines. La communauté « paléo » est très active et une grande partie de ses membres est reconnue internationalement. Elle s'appuie sur différents réseaux existants ou qui se mettent en place tels que le GDR Climat, Vie, Environnement, très structurant pour la communauté « paléo » ces dernières années, le GDR Rift, RÉGEF, PAGES, IODP et IODP-France.

Cette situation à l'interface de plusieurs domaines de l'INSU et de l'INEE représente une force, mais également une fragilité pour la communauté « paléo ». Cette communauté, pourtant étoffée mais dispersée entre plusieurs instituts et sections, souffre d'un certain manque de visibilité malgré sa structuration au sein de réseaux ou de GDR. Cette situation contribue également à séparer à l'intérieur de la communauté « paléo » les études relatives au Quaternaire (rattachées à la section 19) et celles relatives au pré-Quaternaire (rattachées à la section 18), distinction également présente au sein des appels d'offre de l'ANR ou TELLUS. Il se crée ainsi des discontinuités et un manque d'études intégrées entre systèmes actuels, paléo-récents et paléo-anciens. Cette séparation ne favorise pas le mélange entre les chercheurs travaillant à de courtes et longues échelles de temps. Ce mélange est pourtant souhaitable car ces études portent sur les mêmes processus et le plus souvent sur les mêmes éléments du système climat-géo-biosphère. Un tel

brassage pourrait déboucher sur des pistes de réflexions nouvelles et innovantes. Cette dichotomie se retrouve par ailleurs également dans la participation de ces différents groupes de la communauté « paléo » aux défis inter-domaines de l'INSU. En particulier, malgré des sollicitations actives, la participation de chercheurs travaillant sur des écosystèmes actuels ou sur le Quaternaire et les échelles de temps courtes est restée relativement réduite pour ces Défis 3 et 4. Cette séparation artificielle entre les communautés de chercheurs travaillant sur les systèmes actuels, Quaternaires, et pré-Quaternaire, a été identifiée comme un verrou à lever dans plusieurs groupes de travail au cours de cette prospective relative aux Défis 3 et 4.

Parmi les fragilités de la communauté « paléo » se pose la question particulière de la paléontologie, qui fait notamment face à la difficulté de la gestion et valorisation de ses collections, nécessitant des moyens humains et logistiques qui sont à l'heure actuelle très insuffisants. Il en est de même avec les collections historiques et gisements exceptionnels qui ne sont pas toujours préservés ou étudiés dans les conditions nécessaires correspondant à leur notoriété internationale, ni en accord avec leur importance scientifique. Un autre enjeu est de garantir l'accès à de nombreux sites d'études comme les sites à préservation exceptionnelle, parfois rendu compliqué, voire impossible, par des enjeux politiques/commerciaux locaux, même en France.

# 1. Questions et verrous scientifiques identifiés, pistes à explorer

La notion de crise est apparue comme trop réductrice à l'ensemble des participants aux deux défis. Les réflexions ont ainsi été élargies aux perturbations, environnementales et de la biosphère, dépassant la variabilité d'un état de base, dont l'étude est elle-même nécessaire pour identifier des seuils au-delà desquels le système bascule de la résilience à la rupture. Dans ce contexte, les intervalles de relative stabilité du système climat-géo-biosphère, généralement beaucoup moins étudiés, présentent en eux-mêmes un intérêt en fournissant un état de référence du système.

Restent aujourd'hui en suspens plusieurs grandes questions qu'il est nécessaire d'explorer pour mieux comprendre la dynamique des crises à différentes échelles d'espace et de temps, et qui peuvent fédérer les communautés travaillant à la fois sur les environnements et écosystèmes actuels comme passés. Ces questions ont été abordées au sein de différents groupes de travail, dont les réflexions sont synthétisées ci-dessous.

## L'ENREGISTREMENT DU TEMPS : UN CADRE FONDAMENTAL POUR L'ÉTUDE DES CRISES

La nécessité d'une échelle des temps géologiques la plus précise possible est une priorité sans laquelle aucune étude de la dynamique des crises, impliquant de connaître notamment la vitesse des changements identifiés, n'est possible actuellement. Les phénomènes géologiques, en particulier ceux ayant lieu lors d'événements critiques, sont analysés à des résolutions toujours plus élevées. Pour cela, les échelles de temps utilisées doivent être améliorées en permanence, notamment dans le but d'établir des corrélations à plus large échelle et d'analyser les relations de cause à effet d'un phénomène géologique.

L'échelle des temps géologiques est la combinaison, variable selon les époques considérées, entre des datations absolues/radiométriques, des datations relatives apportées essentiellement par la biostratigraphie, et plus récemment de datations résultant d'une calibration astronomique. La lente érosion des compétences en biostratigraphie est un constat récurrent depuis des dizaines d'années. Un effort pour soutenir la discipline serait indispensable car la biostratigraphie est le seul moyen de dater les séries sédimentaires anciennes (Paléozoïque au Cénozoïque). La notion d'échelles de temps « flottantes », apportées par les analyses cyclostratigraphiques, permettent localement d'estimer très précisément la durée d'un phénomène géologique enregistré dans une série sédimentaire, par exemple à quelques milliers d'années près pour un événement Mésozoïque.

Pour le Quaternaire, les chronologies établies sont de plus en plus souvent communes à plusieurs sites d'étude, et incluent divers types d'archives. Elles sont issues de datations radiochronologiques absolues, de corrélation d'événements globaux (e.g. excursions magnétiques) et d'hypothèses d'alignement d'événements climatiques. Des avancées majeures sur les datations absolues et les outils bayésiens d'intégration chronologique, deux domaines dans lesquels la communauté paléo française est à la pointe, permettent d'étudier les séquences d'événements climatiques avec précision (e.g. quelques centaines d'années vers 40 ka, 1-2 ka vers 125 ka).

Des compétences sont présentes en France dans les nouvelles méthodes de datations radiométriques (e.g. U/Pb dans les carbonates, U/Pb dans les zircons,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dans les téphras et les laves, isotopes cosmogéniques,  $\delta^{40}\text{Ar}$  des gaz des glaces). De même, des compétences dans le domaine de la cyclostratigraphie/calibration astronomique sont très présentes au niveau international. Une équipe française est leader mondial dans l'établissement des modèles astronomiques permettant la calibration astronomique des temps géologiques. Des initiatives françaises utilisées comme référence dans plusieurs projets internationaux existent également pour l'établissement d'échelles de temps multi-archive (e.g. logiciels DATICE et PaleoChrono) ou l'interprétation des nucléides cosmogéniques (e.g. logiciels CREP et BASINGA). Ainsi, des nombreuses pistes se dégagent :

- Il est essentiel de développer une vision intégrée des changements passés décrits par les différentes archives via le développement d'outils chronologiques permettant de fournir une datation commune aux différentes archives, l'intégration de différents traceurs (isotopes ou autres) dans les modèles de climat. C'est vrai à toutes échelles de temps, sachant que la diversité des archives est encore plus complexe pour le Quaternaire. En particulier les méthodes de datation des séries sédimentaires en domaine continental constituent un verrou à lever pour améliorer les corrélations nécessaires entre domaines marin et continental, à toutes échelles de temps.
- Il faut estimer plus précisément les durées des *hiatus* dans les séries sédimentaires pour comprendre les phénomènes géologiques enregistrés dans ces séries. Il serait ainsi crucial d'encourager le développement de nouvelles techniques pour mesurer les taux de sédimentations (e.g. développement du traceur par  $^3\text{HeET}$ , approches de datation orbitale)
- Il faut prolonger la calibration astronomique des temps géologiques du Cénozoïque au Mésozoïque, un défi qui passe par des coopérations entre stratigraphes et astronomes.

- Il apparaît nécessaire de coopérer au-delà de la simple communauté des géologues afin d'obtenir des analyses statistiques des différentes données ou établir des incertitudes chiffrées. Il est indispensable de quantifier (et éventuellement comprendre le mécanisme associé) la variabilité naturelle des différents signaux à différentes échelles de temps (notamment quaternaires), pour définir les états de base avant les transitions pour envisager des analogies avec les perturbations anthropiques : développements de fonction de transfert (incluant observations, expériences de laboratoire, modélisation numérique, amélioration de la datation, et acquisition de données ciblées).
- Un dernier point est l'importance d'accentuer l'effort sur l'amélioration du calage relatif des archives et l'évaluation des fonctions de transfert entre le processus et l'archive (lien avec question 5 « La fabrique du signal paléo »). Cela passe notamment par le développement de nouvelles techniques et de modélisations intégrant de multiples traceurs. Par exemple, de nombreuses pistes prometteuses peuvent être développées ou approfondies pour contraindre la fonction de transfert, le lissage dans les archives sédimentaires (e.g. marines, lacustres), glaciologiques ou encore les spéléothèmes et plus généralement la synchronisation entre ces archives : l'utilisation des événements quasi-instantanés (e.g. impacts de météorites, inversions du champ magnétique terrestre, éruptions volcaniques, événements type Dansgaard-Oeschger), l'utilisation des téphras ou d'études magnétostratigraphiques comme outil de corrélation longue distance et plus généralement les analyses multi-traceurs.

Malgré une forte expertise, la communauté française est très peu présente dans les synthèses conduisant aux publications régulières de nouvelles échelles des temps géologiques. Les stratigraphes de France sont également peu présents dans les instances de la Commission Internationale de Stratigraphie (IUGS/UNESCO) alors que la France est un pays qui possède de nombreux GSSPs (Global Boundary Stratotype Section and Point) sur son territoire. De manière générale, la participation de la communauté aux instances de la Commission Internationale de Stratigraphie, et donc son implication dans l'établissement des échelles de temps géologiques, doit être encouragée et soutenue par les tutelles et non considérée comme accessoire.

La communauté française dans le domaine de la géochronologie et de la stratigraphie apparaît peu structurée. Des compétences sont présentes mais peu visibles, parfois isolées. Une meilleure coordination des moyens analytiques est en cours, telle la mise en place du réseau national RE-GEF. Cependant, la création à l'INSU d'une structure et/ou d'un programme pour fédérer la communauté autour des disciplines multiples de la géochronologie et de la stratigraphie pourrait être une piste de réflexion. Cela passe d'abord

par un recensement des expertises dans un esprit de coopération et non de compétition, et sans doute par l'organisation d'ateliers et d'écoles d'été.

### DE LA RÉSILIENCE À LA RUPTURE : ÉTAT DE BASE DU SYSTÈME, SEUILS, AMPLITUDE ET VITESSE DES PERTURBATIONS

Comment bascule-t-on de la résilience à la rupture ? À partir de quel moment et de quel seuil les changements imposés par différents forçages deviennent-ils irréversibles ? Quelle est l'importance relative de la vitesse, de l'amplitude des changements, du cumul de différents événements ou forçages sur le basculement dans un état de crise ? Ces questions restent encore ouvertes à l'heure actuelle, malgré les nombreux travaux consacrés à explorer les différents facteurs de perturbation aboutissant à une entrée en crise du système climat-biosphère. Cet effort doit ainsi être poursuivi, en particulier avec le développement constant de nouveaux outils qui ouvrent des perspectives pour mieux contraindre ces perturbations, leur amplitude de variation au cours des crises, et les seuils au-delà desquels le système bascule de la résilience à la rupture. L'amélioration du cadre temporel dans lequel se déroulent ces perturbations est par ailleurs indispensable pour obtenir des contraintes sur la vitesse et la durée des perturbations qui s'appliquent.

Une question qui reste encore relativement peu explorée concerne le rôle de l'état de base du système climat-géo-biosphère sur la réaction de ce système face à une perturbation. Les seuils à franchir pour que le système bascule dans un état de crise sont-ils différents selon l'état de base du système, et selon les régions et écosystèmes étudiés ? En d'autres termes, quel est l'impact d'un même perturbateur pour différents états initiaux ? Et la réponse de la biosphère est-elle différente si une perturbation s'applique sur un état de base « stable » ou au contraire lui-même en transition ?

Pour répondre à ces questions, il est nécessaire d'identifier cet état de base précédant les transitions, qui est l'état du système (état moyen et variabilité) avant qu'intervienne tout un ensemble de perturbations pouvant aboutir à une crise. L'intégration de différentes échelles de temps dans cette réflexion prend ici toute son importance. En effet, si l'on considère par exemple les perturbations d'origine anthropique qui affectent aujourd'hui notre système climatique, l'état de base du système est l'état pré-industriel au sein de notre interglaciaire actuel (par exemple en ce qui concerne la quantité de CO<sub>2</sub> atmosphérique, ou de température moyenne à la surface du globe). Cependant si l'on considère une période de temps beaucoup plus longue, sur plusieurs dizaines de millions d'années, cet état de base peut également être identifié comme l'ensemble du Quaternaire, qui représente un état climatique froid avec des calottes

polaires permanentes (dit de «icehouse») par opposition à un mode climatique plus chaud, sans calotte polaire permanente (dit de «greenhouse») tel que l'Eocène inférieur dans le cas de l'exemple Quaternaire. Ainsi, si connaître l'état du système climat-géo-biosphère précédant immédiatement une perturbation, est important, mieux contraindre l'évolution à long terme de l'état de base de ce système l'est tout autant. Les paramètres permettant de définir cet état de base sont multiples, allant de l'évolution de la quantité de CO<sub>2</sub> atmosphérique à la distribution des continents qui impactent la circulation océanique et le transfert latitudinal de chaleur. Ces paramètres incluent également les flux d'éléments (ex. nutriments) des continents aux océans qui peuvent être différents entre une période d'orogénèse et une période de quiescence tectonique, ou encore la diversité biologique et sa distribution spatiale qui sont dépendants des gradients climatiques et de leur vitesse de changement. Dans ce cadre, une meilleure intégration des cycles de différents éléments ainsi qu'une meilleure intégration de la biosphère dans les modèles restent nécessaires pour prendre en compte un maximum de paramètres représentatifs de l'état de base. Une amélioration de la couverture des données dans les environnements terrestres, souvent beaucoup plus éparses que celle du domaine océanique, est aussi nécessaire.

Une autre question restant en suspens, intrinsèquement liée à cette connaissance de l'état de base du système climat-géo-biosphère, concerne le comportement de la biosphère au cours des périodes de quiescence. Comment la biosphère répond-elle à des perturbations de faible ampleur durant les périodes de quiescence? Pour répondre à cette question, il est nécessaire d'améliorer notre connaissance de ces périodes de quiescence, souvent bien moins étudiées et qui pourtant permettent de mettre en perspective les changements observés au cours des périodes de crises.

Enfin l'étude des périodes transitoires, entre deux états de base et/ou lors d'une entrée ou d'une sortie de crise, reste encore difficile alors que ces périodes sont cruciales pour comprendre l'enchaînement des événements aboutissant ou non à un basculement du système dans un état de crise. Le développement de modèles simplifiés (climatiques, géochimiques, et intégrant la biosphère dans les reconstitutions paléoenvironnementales), seuls à même de fonctionner en état transitoire, est ici une étape nécessaire pour explorer cette question.

### CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES ET CRISES : LIENS ET ENJEUX

Si les grandes caractéristiques des cycles passés de certains éléments majeurs comme C, Ca, O sont maintenant bien connues, des défis majeurs portent encore sur l'évaluation

quantitative des réservoirs (l'exemple le plus emblématique étant la biomasse, continentale ou océanique) et des flux de ces éléments au cours du temps. Pour d'autres éléments majeurs tels que S, P, N, ou Si, des progrès sur les cycles actuels sont identifiés comme absolument nécessaires pour reconstruire leurs variations passées (par exemple sur les flux apportés par les rivières aux océans, ou ceux issus de la diagenèse). Des effets de seuil biologiques peuvent exister, notamment eu égard au statut double de «bio-nécessaire» et toxique de nombreux éléments : Ca, As, Fe, Ge, Hg, Li, métaux (co-enzymes : Mo, V, Mn, Fe). L'identification et l'intégration dans les modèles, de ces seuils et des conséquences de leur émission massive en cas de perturbation volcanique, d'impact météoritique, ou de pollution humaine, sont des enjeux majeurs.

De manière générale, un enjeu majeur est la reconstruction de flux absolus. Les outils géochimiques, par exemple isotopiques, donnent en effet accès à des flux relatifs. Il sera fondamental de pouvoir distinguer flux nets (par exemple enfouissement de carbone organique) et flux bruts (par exemple productivité primaire) en ce qui concerne les productions organiques, siliceuses ou carbonatées, ou encore la formation de pyrite. De telles connaissances affineront l'appréhension des temps de résidence des éléments dans les réservoirs géochimiques de la surface de la Terre. Les modèles numériques pourraient ici jouer un rôle central, mais la communication avec les données doit être améliorée par la définition d'un langage commun. Ceci permettrait également des progrès sur un problème majeur : la distinction entre effet global et effet local, un verrou omniprésent dans les études (paléo)environnementales. De même, l'interaction géochimie - (nano/micro)paléontologie doit être encouragée pour mieux comprendre les synergies à l'œuvre dans les contrôles paléoenvironnementaux, la préservation des signaux, la taphonomie ou la diagenèse.

Notre compréhension de l'ensemble des processus «en amont» de l'archive sédimentaire (approche «source-to-sink») reste très limitée. Des grandes inconnues demeurent autour du transport de particules et du carbone organique particulaire par les rivières, ou des poussières atmosphériques. Des incertitudes restent aussi autour des flux dissous et de l'altération continentale et de ses contrôles (en particulier le rôle des sulfures). Une piste pour progresser dans ces directions est l'étude de systèmes continentaux fermés, tels que les bassins endoréiques ou lacustres.

D'autres points sont critiques. D'une part, l'influence de l'histoire tectonique de la Terre sur les cycles biogéochimiques est toujours débattue. Par exemple, le budget net en carbone de l'Himalaya demeure à ce jour un débat : puits de CO<sub>2</sub> (altération, enfouissement de matière organique, apport d'éléments pour production organique dans l'océan) ou source de CO<sub>2</sub> (métamorphisme, oxydation de

carbone organique fossile)? Comment contraindre l'évolution des flux associés à la subduction? D'autre part, les effets de la diagenèse sur les cycles biogéochimiques restent peu contraints. Les flux associés sont parfois mal connus pour l'actuel comme l'ancien (e.g. formation d'argiles et carbonates authigènes, production/consummation d'alcalinité, réduction microbienne des sulfates).

### FACTEURS INTRINSÈQUES DÉTERMINANT L'ENTRÉE EN CRISE ET LA RÉSILIENCE DES ÉCOSYSTÈMES : APPROCHE MULTI-ÉCHELLE ET INFLUENCES ANTHROPIQUES

Quels facteurs intrinsèques sensibilisent les écosystèmes aux perturbations? Dans quelle mesure modifient-ils l'entrée en crise et les capacités de résilience de ces écosystèmes? Contrairement aux multiples recherches menées sur les causes abiotiques des extinctions, celles portant sur les facteurs biotiques accélérant l'entrée en crise ou permettant la résilience des écosystèmes restent peu nombreuses. En particulier, les trop rares approches expérimentales et comparées sur la déstabilisation des écosystèmes et des communautés (espèces clé de voûte, diversité fonctionnelle, invasions, point de bascule...) n'ont pas été conduites dans la perspective de faire le lien entre l'actuel et le passé, ni de l'étendre à des contextes absents aujourd'hui, ni d'étudier les processus à différents pas de temps. Aussi des questions fondamentales restent ouvertes. Existe-t-il des motifs et des processus communs? Comment les facteurs intrinsèques à la biodiversité interagissent-ils avec les variations environnementales pour expliquer l'entrée en crise et la résilience des écosystèmes? De plus, il est connu que les écosystèmes très circonscrits sont les plus sensibles aux crises et les moins résilients, notamment en milieu insulaire. Cependant, bien qu'étant partagées par de nombreuses disciplines, les notions d'insularité et d'invasion sont appréhendées de façon contrastée et à des échelles spatio-temporelles très différentes (depuis les petites îles océaniques jusqu'aux continents).

Les verrous identifiés sont: les limites de l'actualisme en lien avec l'anthropisation des milieux; la relative étanchéité entre les communautés scientifiques étudiant l'Actuel, le Quaternaire et l'Ancien; l'absence de consensus sur ce qui est compris sous le vocable d'«écosystèmes stables»; la faible part de la communauté investie dans les approches expérimentales centrées sur les facteurs biotiques. En conséquence, il est proposé d'explorer les pistes suivantes:

- Intensifier les approches expérimentales. Cela pourra consister, par exemple, en l'étude des conséquences du remplacement ou de la suppression d'espèces dans la résilience de communautés face à des facteurs perturbateurs contrôlés. L'analyse des processus déstabilisants devra être conduite pour des communautés de microbes, de métaphytes et de métazoaires en milieu marin ou

continental. Cela consistera aussi à analyser le rôle écologique des espèces calcifiantes dans le contexte de l'acidification et à la désoxygénation du milieu.

- Questionner la fragilité des écosystèmes à différentes échelles de temps et d'espace. Cette analyse pourra porter prioritairement sur la notion «d'insularité» déclinée à de multiples échelles (îles de petite surface, zones d'endémisme marines ou terrestres, continents isolés, avec ou sans influence humaine). Cela conduira à tester simultanément les concepts associés aux espèces invasives et à la notion de zone refuge à l'échelle des temps géologiques.
- Étudier les dynamiques écologiques et la récupération écosystémique suite aux exploitations humaines et à leurs déprises par l'analyse croisée de la résilience d'écosystèmes récents et sub-récents. Ce volet, à l'interface entre archéologie et écologie, permettra de mieux appréhender la part des facteurs biotiques dans la résilience et le rebond des communautés suite aux perturbations d'origine anthropique. Il implique le développement des suivis à moyen et long termes dans des milieux modèles ou sensibles.
- Renforcer ou faire émerger des infrastructures de type «écotrons» (pour étude en macrocosme, mésocosme ou microcosme), reste une démarche expérimentale indispensable à l'analyse des propriétés intrinsèques des organismes.
- Développer simultanément la modélisation de communautés ou d'écosystèmes, tout en mobilisant ou développant les suivis à long et moyen termes.

### LA FABRIQUE DU SIGNAL « PALÉO » : DE LA SOURCE VERS L'ARCHIVE

Quelle est la signification des analyses et mesures effectuées sur les sédiments? Les mesures et observations réalisées sur des objets sédimentologiques et paléontologiques prennent leur sens au regard de la compréhension des mécanismes à l'œuvre durant leur formation et leur archivage. Trois axes prioritaires sont identifiés permettant de mieux contraindre ces mécanismes:

- Développer des expérimentations: culture d'organismes afin de tracer les effets vitaux, de calibrer les *proxies* géochimiques comme par exemple les isotopes du bore, les alcénones, les isotopes du soufre, les rapports élémentaires...; effectuer des cultures d'organismes en conditions contrôlées sur par exemple des brachiopodes, des coccolites et estimer la part organique/inorganique dans les carbonates en analysant les effets vitaux; comment réagissent morphologiquement et isotopiquement les organismes sous un stress climatique/paléoclimatique ou suite à une éruption volcanique?; tester les *proxies* dans des milieux naturels fermés (e.g. lacs de montagnes, milieu marin contrôlé) ou le long de profil de dépôt ou de changements d'environnements (par exemple la transition environnement terrestre-marin) afin de dissocier la

- part dissoute et particulière de charges sédimentaires ;
- Caractérisation de la temporalité des enregistrements géochimiques et minéralogiques (variations saisonnières, annuelles, millénaires) au sein de tissus biologiques (minéralisés ou non, par exemple coquilles, dents, bois) ou d'archives sédimentaires (par exemple, analyse des propriétés magnétiques ou de la matière organique sédimentaire). Développer en parallèle les études temporelles haute-résolution : liens avec la cyclostratigraphie, la tephrostratigraphie. Peut-on mieux identifier les événements singuliers dans ces séries, tels que les paléotsunamis par exemple ? Un travail sur les critères d'identification des paléo-perturbations ponctuelles dans les séquences s'avère nécessaire. Enfin, peut-on mieux estimer/quantifier les flux sédimentaires, notamment associés à la mise en place des reliefs ?
- Mise en valeur des études multiproxys afin de mieux isoler et comprendre un signal donné au sein d'archives anciennes. Cerner les verrous de l'actualisme : développement de l'approche intégrée multiproxy. Par exemple, développer les essais d'estimation en paléotempératures et paléoprécipitations associées à la végétation ?

## LA BIOSPHÈRE AU SEIN DES MODÈLES CLIMATIQUES ET GÉOCHIMIQUES

La modélisation numérique des différentes composantes du fonctionnement du système Terre, des cycles biogéochimiques à la dynamique du climat, en passant par la biodiversité et la distribution d'espèces, et leur application aux problématiques « paléo » est en expansion depuis une trentaine d'années. Cet essor repose sur l'apport conjoint de nouvelles données via notamment le déploiement de réseaux d'observation permettant une meilleure compréhension des processus et l'augmentation de la puissance de calcul informatique. Ainsi, les modèles climatiques s'échelonnent de modèles simples adimensionnels, aux modèles « système Terre » (ESMs, pour Earth system model) permettant de simuler à l'échelle globale les interactions de l'atmosphère, des océans, de la banquise, des sols, de la végétation et de la biogéochimie marine, en passant par des modèles de complexités intermédiaires (EMICs) permettant de faire de longues intégrations (cycles glaciaires-interglaciaires). En France, l'ESM de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL-CM) et l'EMIC iLOVECLIM sont les deux modèles les plus utilisés pour étudier les climats passés. L'étude et la compréhension des mécanismes des changements climatiques sur des échelles de temps géologiques nécessitent la mise en œuvre d'expériences de sensibilité à un jeu de conditions limites : paléogéographie, glace continentale, composition chimique de l'atmosphère, constante solaire, paramètres orbitaux, et concentrations en gaz à effet de serre, notamment. L'impact de ces conditions aux limites sur le climat peut ainsi être quantifié et comparé aux indicateurs paléoclimatiques.

Notre capacité à modéliser les climats passés repose donc à la fois sur les performances de l'outil utilisé et sur notre connaissance de ces conditions aux limites. L'intégration de la biosphère dans l'ESM de l'IPSL se fait, sur les continents, via une représentation de la végétation développée à partir des caractéristiques de la couverture végétale actuelle et regroupée en grands types fonctionnels de plantes (Plant Functional Types, ou PFTs). Le rôle de la végétation est crucial car elle rétroagit avec les premières couches de l'atmosphère en modifiant le rayonnement et les flux turbulents (chaleurs sensible et latente) via son albédo, sa taille, son couvert et son évapotranspiration, modifiant le cycle hydrologique, les températures de surface et les régimes de précipitation à grande échelle. Elle a également un rôle direct, via sa productivité, sur les cycles biogéochimiques (et notamment le cycle du carbone). Néanmoins, les PFTs actuels ne sont pas représentatifs des flores passées, dont les traits physiologiques (et donc le rôle dans les rétroactions sus-citées) ont énormément évolué depuis le Dévonien. La représentation de la paléovégétation dans les modèles climatiques est donc un réel défi, qui nécessite de prendre en compte les contraintes issues du registre fossile, et donc un travail collectif associant paléobotanistes et modélisateurs.

De façon analogue, la modélisation des cycles biogéochimiques du carbone et des principaux nutriments dans les ESMs intègre les niveaux inférieurs des chaînes trophiques. Cette composante du modèle est là aussi développée d'après les caractéristiques des écosystèmes marins actuels. Est-elle transposable dans le passé ? La taille des zooplanctons a évolué au cours des périodes géologiques. Quelle influence cette évolution a-t-elle eu sur les cycles biogéochimiques ? Comment la biomasse a-t-elle évolué ? La productivité primaire des océans est également liée à l'apport de nutriments depuis les continents par les rivières et le vent. Mais ces apports ont évolué au cours du temps car la paléogéographie a changé et le climat a évolué. Des périodes plus sèches ont pu favoriser des poussières désertiques importantes tandis que des précipitations plus intenses ont pu renforcer l'apport de nutriments par le ruissellement. Prendre en compte ces mécanismes est donc nécessaire pour améliorer notre compréhension de l'évolution du système climatique. Ce défi implique un rapprochement entre les modélisateurs des cycles biogéochimiques (actuels), des paléontologues et des géologues.

Pour mener à bien l'intégration de la biosphère dans les modèles, des appels à projets spécifiques sont nécessaires afin de favoriser d'une part les collaborations entre paléobiologistes et modélisateurs des climats et cycles passés, et d'autre part d'impliquer les développeurs et décisionnaires des orientations de développement des modèles afin de s'assurer de l'adaptation des codes aux problématiques des environnements anciens, et de sa pérennisation.

## TAPHONOMIE ET DIAGÉNÈSE

Les processus taphonomiques et diagénétiques sont par nature complexes et multi-phasés, représentant un biais d'enregistrement crucial déformant de façon plus ou moins importante les signaux primaires, qu'ils soient paléontologiques, sédimentologiques ou géochimiques, et même les phénomènes plus récents comme la formation des glaces. Ces processus étaient, jusqu'à très récemment, peu étudiés en détail, la communauté nationale sur le sujet étant relativement restreinte. Un récent regain d'intérêt pour ces thématiques est observé, par ex. dans le cadre des gisements fossilifères à conservation exceptionnelle où les apports de nouvelles techniques de pointe (e.g. CT-Scan,  $\mu$ XRF Synchrotron) permettent d'améliorer considérablement nos connaissances sur ces processus et d'obtenir de meilleures reconstructions paléoenvironnementales. Taphonomie et diagenèse sont donc maintenant considérées comme porteurs majeurs de nombreuses informations (par ex. rapidité d'enfouissement, circulations successives de fluides, ouverture de failles, diffusion entre roche et glace, paléocycles biogéochimiques) ainsi que de leur évolution temporelle, qu'il faut appréhender pour progresser dans notre connaissance de la mise en place et de la préservation des différents enregistrements géologiques. Plusieurs constats ont émergé, notamment la nécessité d'une identification et une compréhension fines des différentes phases de ces processus, en accédant aussi à la datation et durée des différents stades/cycles de transformation. L'étude de la continuité des enregistrements à différentes échelles spatio-temporelles est donc aussi à mettre en avant, notamment l'évaluation du temps manquant dans ces processus. Plusieurs sujets particuliers restent aussi très mal compris et nécessitent une évaluation complète: rééquilibrage isotopique, transformations «solide-solide» (sans modification morphologique macroscopique). Les processus post-échantillonnage, se déroulant dans les laboratoires ou dans les collections, sont bien souvent peu pris en compte dans les interprétations. D'ailleurs, le stockage, le suivi et la pérennité des collections est critique et un soutien accru du CNRS est demandé. L'utilisation de techniques de plus en plus sophistiquées pouvant descendre à des échelles d'objet extrêmement fines (par exemple synchrotron, CT-Scan), comparées à des techniques s'attachant à des échelles d'études plus larges, pose de nombreux problèmes interprétatifs d'*upscaling/downscaling*.

Les projets expérimentaux sur du moyen/long terme de fossilisation/minéralisation en milieux contrôlés connaissent un succès international grandissant. Une partie de nos activités devraient se développer en ce sens pour ne pas manquer les avancées associées. Il pourrait s'agir notamment de la mise en place d'expériences contrôlées en milieu naturel et/ou en laboratoire en tentant de se rapprocher des conditions naturelles. Des expériences à très petite échelle ont commencé localement mais une action coordonnée, natio-

nale, voire une infrastructure («Pourritron»), soutenue sur plusieurs années (10-20 ans et plus), à l'instar des Ecotron mis en place au sein de l'INEE, apparaît comme nécessaire et serait un vrai tremplin.

Enfin, un dernier consensus est ressorti des échanges: le besoin de financer des missions de terrain, notamment pour compléter les données manquantes à la compréhension des processus taphonomiques et diagénétiques. Une question cruciale concerne l'accès à de nombreux gisements exceptionnels français – certains sur des territoires publics, refusé à la communauté académique française. Un soutien appuyé au plus haut niveau du CNRS apparaît nécessaire pour débloquer ces situations incompréhensibles.

## PRISE EN COMPTE DES TRAITS FONCTIONNELS ET DE LA STRUCTURATION DES ÉCOSYSTÈMES DANS LA COMPRÉHENSION DES CRISES

Les études sur les crises biologiques actuelles et passées se fondent en grande majorité sur la biodiversité taxonomique globale et ses fluctuations. Or, les notions d'espèces clés de voûte, d'espèces ingénieurs, de sensibilité et résilience des écosystèmes tendent à démontrer que la biodiversité ne peut à elle seule constituer un bon indice écologique, et qu'une approche globale ne peut refléter la complexité des perturbations ou des mécanismes de crises à différentes échelles écologiques, spatiales (géographie et biogéographie) et temporelles. Les crises biologiques majeures, définies comme des chutes brutales de la diversité taxonomique sont-elles également sélectives vis-à-vis de fonctions écologiques ou de métabolismes, ou encore de certains écosystèmes en fonction par exemple de seuils de complexité trophique? La structure des écosystèmes a-t-elle évolué au cours du temps et notamment au cours des crises? La réaction des écosystèmes varie-t-elle selon les perturbations, selon les crises, et dans ce cas, selon quels facteurs et processus biotiques et abiotiques (ex. réchauffement climatique)? Ces questions sur l'ancien sont fondamentales à la bonne compréhension et anticipation des événements actuels (choix d'ODD, transition écologique); mais sont aussi transverses à différentes problématiques identifiées en sciences de la Terre (résilience des écosystèmes, cf. atelier 4; importance d'une approche fonctionnelle pour les modèles paléoclimatiques, géochimiques, cf. atelier 3; impact diagénétique sur les signaux enregistrés). L'identification exhaustive des communautés passées et actuelles est contrainte par des biais taphonomiques ou humains; l'identification des relations écologiques au sein d'écosystèmes demeure quant à elle beaucoup plus complexe. Les études des réseaux écologiques actuels passent ainsi souvent par des modélisations, alors qu'en paléontologie l'identification de ces relations écologiques elles-mêmes, tout comme l'identification des traits fonctionnels des organismes s'avèrent un verrou scientifique majeur. Les preuves directes d'interactions entre espèces sont rares dans le registre fossile,

tous les individus ou fonction d'une communauté n'ayant pas le même potentiel de fossilisation.

Seul le développement d'une approche pluridisciplinaire intégrée (paléontologie-géochimie-écologie-modélisation-biologie des organismes) permettrait des avancées majeures dans la compréhension des perturbations des écosystèmes et des crises biologiques (nature, processus, contrôles). Les biologistes, écologues et géologues développent en effet des approches (bio)géochimiques (biomarqueurs, fractionnement isotopique), morphofonctionnelles et statistiques (modélisation) complémentaires et transférables qui permettraient à terme d'identifier des métabolismes et traits fonctionnels, de tester des hypothèses de segments au sein de réseaux, etc., et ainsi de contourner les verrous actuels. Pour les périodes les plus anciennes, l'approche globale de la diversité et de ses contrôles qui domine les travaux actuels devra à cette fin être complétée par un retour à des études intégrantes (chantiers) à l'échelle des écosystèmes, donc locales.



Elise KALI / IPGS / CNRS Photothèque



Elise KALI / IPGS / CNRS Photothèque

## 2. Recommandations

### MOYENS À METTRE EN ŒUVRE

Un verrou commun à une grande partie des groupes de réflexion mis en place dans le cadre de ces deux défis sur les Grandes Crises concerne le manque d'interactions entre les différentes communautés de chercheurs travaillant sur des systèmes actuels, Quaternaires, et pré-Quaternaires, mais aussi entre les paléobiologistes et les modélisateurs des climats et cycles passés, ou encore entre les paléontologues et sédimentologues d'une part, et les biologistes et les écologues d'autre part.

Une réflexion sur la place des études « paléo » (notamment paléoenvironnements, paléobiosphère, paléoclimats, paléocéanographie) est sans doute à effectuer pour promouvoir les liens paléontologie-sédimentologie-géochimie-modèles, et au-delà avec les biologistes et écologues, voire les SHS. La scission artificielle, que promeut la séparation de la communauté dans différentes sections CNRS entre époques d'étude, en particulier Quaternaire et pré-Quaternaire, apparaît contre-productive et une réflexion pourrait être entamée autour d'une restructuration des sections. Cette scission est également handicapante à l'ANR où les questions relatives aux environnements et systèmes pré-Quaternaires sont évaluées au sein d'un Comité d'évaluation aux contours très larges. La nécessité de rapprocher la communauté des scientifiques qui développent les codes pour modéliser une Terre moderne avec (i) la communauté des paléontologues, des paléobotanistes et des géologues et (ii) la communauté des modélisateurs des climats anciens apparaît également fondamentale.

La mise en place d'écoles thématiques, de workshops puis de GDR supplémentaires dédiés à ces décroissements permettrait de rapprocher les communautés (INEE-INSU-INSB) et de définir à court terme les contours et objectifs d'appel à projets émergents intra et inter-instituts. À plus long terme, afin de coupler la nécessité d'approches pluridisciplinaires et locales, ce réseautage devrait aboutir à l'identification de chantiers communs qui pourront faire l'objet d'un appel à projet de plus grande ampleur (sur le modèle du développement et structuration depuis quelques années des recherches interdisciplinaires autour du Grand Rify africain). Il s'agira ici de coordonner des recherches et de financer des missions communes ainsi que le traitement des données recueillies sur un chantier scientifique majeur.

Les débats ont souligné l'importance d'une redéfinition de la pluridisciplinarité, trop souvent fondée sur des critères administratifs (inter-UMR, inter-instituts) et non de compétences. Les champs disciplinaires couverts au sein et entre

les laboratoires de l'INSU sont en eux-mêmes extrêmement vastes et complémentaires (paléobiologie, géochimie, paléoclimatologie, etc.). D'autre part, la communauté alerte sur les risques du développement de profils interdisciplinaires qui ne correspondraient pas aux critères et structures de recrutement actuels. Pour autant, la promotion d'interactions entre chercheurs de différentes disciplines, si elle est essentielle, ne doit pas se faire au détriment des études disciplinaires qui restent tout autant au centre d'avancées scientifiques majeures. Un certain équilibre doit pouvoir être maintenu entre recherches pluridisciplinaires et recherches au cœur d'une discipline spécifique.

Enfin, les échanges ont montré la nécessité de maintenir des appuis à la recherche à différentes échelles et variés, incluant appels d'offre et soutien de base, seuls garants de l'émergence et du développement d'axe de recherches novateurs. La faiblesse du soutien de base des laboratoires est problématique, notamment pour les disciplines où l'acquisition de données nécessite des moyens récurrents, pour faire fonctionner les instruments ou effectuer des missions de terrain. Or, le soutien de base de laboratoire est un moteur de l'excellence, de l'innovation et du cœur des recherches disciplinaires. S'il est possible de trouver des fonds pour l'acquisition d'instruments, pour les grands projets de collectes d'échantillons, le fonctionnement et le soutien en ressources humaines (thèse, stages de master) sont des poids importants qui restent souvent négligés. Un soutien de base accru serait également indispensable à la bonne tenue des collections diverses, notamment d'échantillons (micro)paléontologiques. Un constat fréquent est le manque d'appels d'offre « intermédiaires », entre les appels d'offre de type SYSTER ou INTERRVIE et de type ANR, et la nécessité d'un soutien accru aux jeunes recrutés. Continuer d'encourager les actions structurantes est indispensable. Les AO existants des projets TELLUS sont unanimement reconnus comme essentiels à notre communauté, car tous les projets ne nécessitent pas forcément des budgets très conséquents. Il apparaît cependant important de développer des AO avec un taux de succès raisonnable pour des projets de l'ordre de 50 à 150 k€, pouvant être pluriannuels sans nécessité de soumettre à nouveau le projet pour chacune des années de financement prévues au départ. Enfin, un enjeu commun à tous est le besoin de développer davantage de campagnes d'échantillonnage ambitieuses (par exemple, forages continentaux, important également en géochimie et en sédimentologie; campagnes en mer ou aux pôles; explorations et fouilles paléontologiques).

Favoriser des interactions (notamment amont) avec des informaticiens et des spécialités de traitement des don-

nées pourrait également être une piste pertinente, pour comprendre les pré-requis nécessaires à la mise en place de techniques d'apprentissage ou d'IA, afin que les jeux de données à venir soient acquis dans les conditions requises à l'application de tels outils. Tous les membres de la communauté ne sont pas en situation de travailler avec des jeux de données suffisants ou possédant les qualités nécessaires pour amorcer un tel virage. Le manque de moyens, notamment, peut empêcher d'acquérir des données en aussi grande quantité sur un certain nombre d'instruments. Une piste originale pourrait être une réflexion sur des services d'observation « paléo ».

La place des données est centrale, non seulement au niveau de l'acquisition de celles-ci mais aussi au niveau de leur stockage et de leur accessibilité au public (association systématique de métadonnées par exemple), pour un travail intégrateur et une inter-opérabilité des données acquises. L'accès aux données et matériels existants (carothèques, collections, bases de données en ligne gérées par des établissements/sociétés à caractère industriel) doit également être facilité selon les moyens du monde académique. Notre communauté doit faire des efforts pour mieux permettre l'interopérabilité des différents types des données et leur pérennité. Il est aussi rappelé la différence fondamentale entre données à acquisition haute fréquence, type balise Argos, satellites ou sismomètres et données isotopiques pouvant nécessiter 36h d'acquisition pour un point, ou deux jours de purifications, et où la production de données elle-même est un acte de recherche. Même si la communauté des géochimistes est favorable à la notion de science ouverte, il est important de ne pas oublier que, dans certains domaines de recherche, c'est la production de données elle-même, ou le développement méthodologique instrumental, qui sont des actes de recherche par eux-mêmes.

### COLLABORATIONS AVEC D'AUTRES INSTITUTS ET PARTENAIRES

Il existe des interactions naturelles nombreuses de la communauté « paléo » avec l'INEE. Cependant, il apparaît encore nécessaire d'encourager la fédération de communautés diverses au sein de l'INEE, en favorisant les collaborations entre paléontologues et sédimentologues avec biologistes et écologues notamment. Ces interactions restent trop limitées alors même que les approches menées par ces différentes communautés sont complémentaires et que leur rapprochement pourrait déboucher sur de nouvelles pistes de recherches novatrices.

Des interactions existent également avec l'IN2P3, notam-

ment en géochronologie. L'intégration du temps est un aspect important, et à ne pas négliger, dans le développement des toutes les problématiques liées à la communauté « paléo », avec parfois des spécificités propres aux différentes périodes de temps considérées. Sur l'analytique, des collaborations avec l'INC et INP apparaissent également pertinentes.

Des collaborations avec l'INSHS, l'INEE, et l'INSB sont également très facilement envisageables pour la mise en place d'actions nationales en particulier sur les expériences de dégradation taphonomique/minéralisation sur le long terme, ces questions intéressant une large part de nos collègues, e.g. paléanthropologues ou zoologues travaillant sur des restes minéralisés. Ces aspects peuvent également intégrer, à l'échelle de différents instituts, les problématiques de conservation et d'archivage de collections/échantillons. Des collaborations avec l'INSB et les archéologues pourraient être développées à travers la paléontologie et la reconstruction des paléoenvironnements (e.g., ADN fossile, biomarqueurs, datations carbone 14), de même qu'avec Inria pour des thématiques ayant trait à l'imagerie par exemple.

En étendant le concept de « grandes crises » aux perturbations de l'environnement et de la biosphère actuelles et à venir, des collaborations originales doivent émerger avec des chercheurs du domaine SHS. Enfin, dans les questions de paléoenvironnements notamment récents, ou sur les liens avec la mise en place des ressources, des interactions existent déjà avec l'IRD, l'IFREMER, le BRGM, les Universités.

### OUTILS ET COMPÉTENCES DU FUTUR

La communauté nationale des taphonomistes et diagénétiens utilise déjà un large spectre de techniques de pointe (e.g. Synchrotron, CT-Scan) pour mener à bien leurs études. Un accès à certains grands instruments nationaux, tel que le synchrotron, devrait toutefois être facilité, notamment dans le cadre d'une plus grande ouverture à des tests préliminaires avant de se projeter dans des projets plus aboutis.

Au niveau de l'étude du fonctionnement des écosystèmes, la démarche expérimentale indispensable à l'analyse des propriétés intrinsèques des organismes nécessite de renforcer ou de faire émerger des infrastructures de type « écotrons » (pour étude en macrocosme, mésocosme ou microcosme), de développer simultanément la modélisation de communautés ou d'écosystèmes, tout en mobilisant ou développant les suivis à long et moyen termes.

Encourager le développement de modèles simples par les modélisateurs, mieux à même de cerner les mécanismes

d'enregistrement des traceurs sédimentaires, paléontologiques et géochimiques, apparaît nécessaire. Un point demeure qui continue de faire obstacle à l'utilisation des modèles climatiques et géochimiques: les modèles actuels ne donnent que des états finis et non des états transitoires. Or, ces derniers seraient plus pertinents pour l'étude des grandes crises. Des développements dans ce sens sont encore nécessaires et s'avèreraient précieux pour aller plus loin sur les questions des modalités d'entrée en crise notamment. Le développement de modèles de systèmes terrestres de plus en plus complexes nécessite toujours plus de puissance de calcul sur les moyens nationaux. L'intégration de davantage de *proxies* géochimiques dans les modèles géochimiques et climatiques est également une direction qu'il conviendrait d'encourager. Le développement d'outils d'estimations de paléoreliefs est tout autant nécessaire, car la méconnaissance des reliefs pour de nombreuses périodes de temps reste encore aujourd'hui un frein à une modélisation fiable du climat pour ces intervalles de temps.

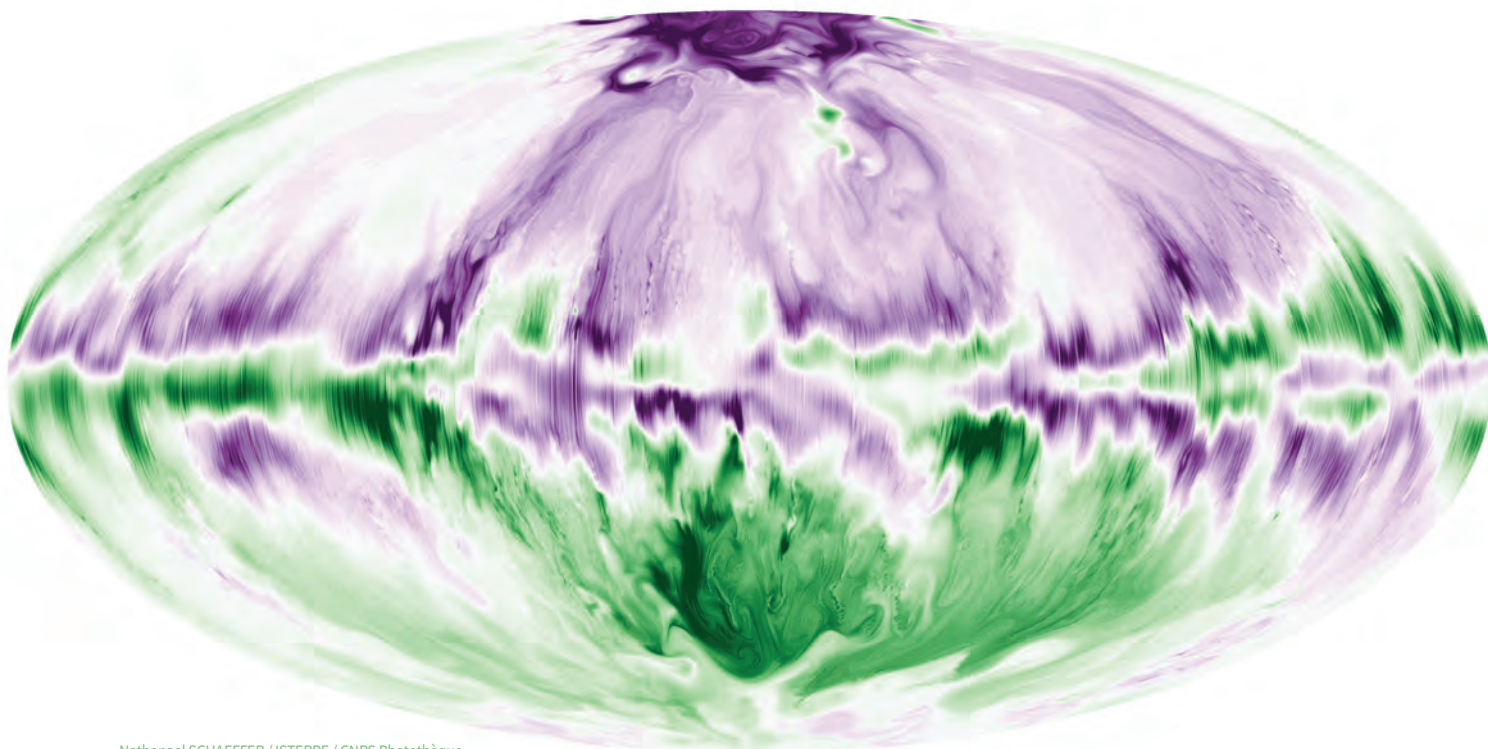
À l'ère du *Big data*, la communauté a besoin de spécialistes en gestion des bases de données et de banques échantillons, une tâche dont ne peuvent s'acquitter les chercheurs/chercheuses. Les données, leur traitement, leur gestion et leur valorisation vont ainsi nécessiter des moyens humains, mais également la gestion à long terme des collections. Un soutien humain accru aux collections est également nécessaire pour pouvoir assurer la pérennité des échantillons/spécimens, parfois uniques, qui y sont présents.

Parfois, les métiers du futur sont des métiers qui ont été oubliés: la France fait désormais face à un manque cruel de spécialistes de la diagenèse et des processus taphonomiques, par exemple. Des compétences sont également en danger de disparition, comme en paléopalynologie des séries pré- quaternaire ou en biostratigraphie. Il y a encore quelques décennies la communauté française était leader dans en biostratigraphie et a laissé petit à petit ce leadership à d'autres communautés européennes.

# Défi 5

Modélisation intégrée  
du système Terre pour  
l'étude des risques  
environnementaux  
et de la vulnérabilité  
des socio-écosystèmes

**Comité scientifique:** Sandrine Anquetin, Anne-Claire Bennis, Florent Deleflie, Agnès Ducharne, Guillaume Dodet, Nicolas Eckert, Davide Faranda, Laure Giamberini, Philippe Gueguen, Alain Herique, Samuel Morin, Olivier Planchon, Didier Richard, Olivier Roche, Isabelle Ruin.



Nathanael SCHAEFFER / ISTERRE / CNRS Photothèque

Le passage à l'anthropocène dans un monde de dimension finie génère des défis d'une grande complexité pour l'humanité. En particulier, la grande accélération visible dans l'évolution de nombreuses variables physiques et socio-économiques depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle (Steffen et al. 2015) pose le problème de l'épuisement à brève échéance de nos ressources, et, plus largement, de la viabilité du système Terre dans son ensemble. Dans ce monde en transition, les risques liés à l'environnement sont exacerbés : catastrophes dites naturelles, perte de biodiversité et ses conséquences, risques écotoxicologiques, etc. De même, de nouvelles situations à risque pour les socio-écosystèmes apparaissent, liées par exemple à la fonte du permafrost, à la montée du niveau de la mer ou à l'apparition de nouveaux agents pathogènes. Parallèlement, l'aversion des sociétés modernes aux situations à risques et la demande de prévention et de protection des populations sont amplifiées. Y participent également la forte médiatisation des événements catastrophiques, ainsi que les atteintes à l'environnement ou à la santé humaine liées à des substances toxiques ou à des contaminants d'origine biologique. Dans ce contexte, il n'est pas surprenant que les scientifiques réunis au sein du réseau Future Earth aient placé en 2020 (avant la crise de la COVID-19) les risques liés aux changements climatiques et aux extrêmes météorologiques « en tête de liste » de leurs préoccupations, aussi bien en termes de probabilité d'occurrence que de sévérité des impacts. Les autres catastrophes naturelles ont été classées juste derrière ces risques. Encore plus significatif : alors qu'il y a 15 ans le Forum économique mondial se préoccupait avant tout des risques d'effondrement économique et de guerre, il a pointé en 2020 les risques liés aux évolutions climatiques et aux extrêmes météorologiques au premier rang des préoccupations sociétales.

Face à ce constat, la nécessité d'une action immédiate et très volontariste fait consensus. De multiples cadres internationaux d'actions se sont progressivement mis en place, de manière de plus en plus contraignante. Si au départ les initiatives étaient disjointes, elles convergent aujourd'hui progressivement autour du *nexus* « réduction du risque de catastrophe » – changement global – développement durable (Peduzzi, 2019). Il s'agit notamment de contribuer à la réduction des impacts adverses sur les sociétés humaines ainsi qu'au renforcement de la résilience et de la gestion intégrée des territoires. Dans le détail, le cadre d'action dit « de Sendai » édicté par les Nations unies pour la réduction des risques de catastrophe (2015-2030) définit classiquement le risque à l'intersection entre aléas, enjeux et vulnérabilité mais promeut à présent fortement le risque systémique (UNDRR, 2019). Ce dernier implique le décryptage des mécanismes causaux conduisant à la catastrophe, et permet ainsi son anticipation, de façon à hiérarchiser les actions de prévention et de remédiation. L'IPCC définit le risque de manière tout à fait analogue, et propose un schéma conceptuel désormais universellement reproduit : un « trèfle » centré sur les problématiques climatiques mais transposable bien plus largement. L'IPBES exprime quant à elle le risque avant tout en termes de perte de biodiversité, mais pointe très clairement les interconnexions affectant l'ensemble des problématiques environnementales concourant au risque. Enfin, au sein des 17 Objectifs de développement durable (ODD), les risques sont à la fois nulle part et partout à la fois. Déclinés sous forme de cibles (environ 10 par ODD), les ODD constituent un cadre souple et englobant à prendre en compte dans l'appréhension des risques environnementaux. En effet, les ODD sont désormais bien connus et acceptés par la plupart des acteurs institutionnels avec lesquels ils peuvent être largement partagés. De fait, une correspon-

dance explicite a été proposée par l'ONU entre les ODD et les cibles du protocole de Sendai, ce qui facilite l'établissement et le suivi d'indicateurs pertinents à faire remonter par l'ensemble des états signataires.

Pour accompagner cette convergence et ce besoin d'agir vite et fort, le monde de la recherche est sommé de trouver des réponses efficaces. La thématique des risques liés à l'environnement se retrouve ainsi au cœur de la prospective scientifique des organismes de recherche française: Météo France (COP 2017-2021), stratégie scientifique du BRGM (COP 2018-2022), stratégie scientifique de l'IRSN (COP 2019-2023), recommandations d'ESPRESSO (2018), prospectives INSU (SIC 2019, risques 2020), séminaire prospectif du CNES (2019), atelier de réflexion prospective INRAEE (2019), séminaire ANR – ALLenvi – Athena « Risques et catastrophes 'naturelles' » (2019). Le GET « Risques naturels et environnementaux » de l'alliance ALLenvi a vocation à contribuer et à fédérer cet effort, en lien avec les autres alliances thématiques nationales et l'ensemble de la recherche française. Néanmoins, la complexité des problématiques abordées et le caractère vital des enjeux associés nécessitent avant tout une mobilisation forte de l'ensemble de la communauté scientifique. Cette dernière requiert sans doute un changement de paradigme profond quant aux questionnements, objets, échelles, abordés, ainsi qu'une meilleure fédération de disciplines complémentaires. Il s'agira également de faire cohabiter au mieux des développements « sectoriels » et des approches plus holistiques.

Au regard des questions posées, une base de discussion correspondant à la synthèse des prospectives passées INSU (AO, TS, SIC) et INEE et du séminaire « Risques et Catastrophes Naturels » organisé par l'ANR et les Alliances de recherche ALLenvi et Athéna en novembre 2019 avait été préparé par les animateurs. Ce travail préliminaire a été complété par une enquête auprès des OSU (voir annexe 1) afin d'identifier le périmètre des risques couverts par les OSU et permettre ainsi une première cartographie qui n'est sans doute pas exhaustive. Il apparaît ainsi que la communauté est très riche et dynamique et aborde une très grande diversité de risques avec des thématiques qui n'apparaissent pas dans les prospectives INSU passées pourtant récentes: météo de l'espace, géocroiseurs, température extrême,

inondations, érosion côtière, vent, pannes de vent, neige, viabilité hivernale, écroulements rocheux, laves et crues torrentielles, aléas d'origine glaciaires et péri-glaciaires, écoulements sous-marins, lahars et écoulements hyperconcentrés, incendie, attribution des événements extrêmes aux facteurs humains, aléas composites (ou concomitants), aléas en cascade, signature sur les milieux de montagne (gravitaires, hydrogéomorpho, cryosphère).

Force est cependant de constater que les laboratoires INSU et les OSU travaillent prioritairement sur l'aléas (et pas nécessairement sur l'ensemble de la chaîne Risque<sup>1</sup>), avec une ligne forte autour de la compréhension des processus, les observations, le suivi des phénomènes, l'identification de précurseurs et la mise en place de prototype de dispositif d'alerte. Ils ont d'ailleurs acquis une reconnaissance forte dans ces domaines. Par contre, les actions autour de la vulnérabilité restent limitées, et reposent souvent sur un besoin de collaborations vers les autres instituts du CNRS, et vers d'autres opérateurs de l'état ou du secteur privé.

Malgré une large diffusion, les prospectives « Risques » colorées INSU ont essentiellement rassemblé la communauté des OSU (76% de l'assemblée) dont 80% traite des aléas. Les questions adressées allaient cependant bien au-delà de cette communauté et les réponses en termes de prospectives restent incomplètes. Le manque de structuration de la communauté, y compris au niveau de l'organisation des prospectives, apparaît ainsi comme une faiblesse pour traiter les risques dans leur globalité.

Une des premières recommandations, qui apparaîtra de façon récurrente au sein des divers ateliers est de décroiser les risques non seulement au niveau de l'INSU mais plus largement au niveau du CNRS.

L'atelier a été porté par l'OSUG (Florence Naaim, Eric Larose, Michel Dietrich) qui s'est appuyé sur un comité scientifique constitué de l'équipe suivante représentant 8 OSU: Sandrine Anquetin, Anne-Claire Bennis, Florent Deleflie, Agnès Ducharne, Guillaume Dodet, Nicolas Eckert, Davide Faranda, Laure Giamberini, Philippe Gueguen, Alain Herique, Samuel Morin, Olivier Planchon, Didier Richard, Olivier Roche, Isabelle Ruin.

1- Aléas: Un aléa est caractérisé par sa localisation, son intensité, son ampleur, sa fréquence et le degré de probabilité qui lui est associé.

Vulnérabilité: La vulnérabilité est la « condition provoquée par des facteurs ou processus physiques, sociaux, économiques et environnementaux qui ont pour effet de rendre les personnes, les communautés, les biens matériels ou les systèmes plus sensibles aux aléas. »

Risques: le risque résulte de la combinaison de l'aléa, de l'exposition, des enjeux et de leur vulnérabilité. Définitions issues du Cahier ANR n°10 - Risques et catastrophes naturels - octobre 2019

# 1. Questions scientifiques

## SYNERGIE OBSERVATIONS-MODÉLISATIONS POUR UNE SIMULATION INTÉGRÉE DU SYSTÈME TERRE POUR L'ÉTUDE DES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX ET DES VULNÉRABILITÉS DES SOCIO-ÉCOSYSTÈMES

Même si cela peut apparaître comme une évidence pour les différents acteurs au cœur de la recherche, il est bon de rappeler que la ligne directrice des programmes de recherches s'appuyant sur une meilleure synergie entre observations et modélisations doit viser l'intégration de l'existant dans une perspective d'innovation dans les domaines de la mesure, des méthodes et de la modélisation.

Dans le domaine des données, l'acquisition de données de qualité est un point clef. Les avancées scientifiques ne peuvent être obtenues aujourd'hui sans la mise en place d'un dispositif combinant astucieusement l'instrumentation spatiale, *in situ* et de laboratoire, pouvant conduire à des développements de nouveaux capteurs, sans oublier la jouvence et la calibration des parcs instrumentaux en place. La qualification de la donnée, essentielle pour le forçage, la calibration et l'évaluation des modèles, est souvent manquante. Il est nécessaire d'identifier collectivement un standard de validation et d'associer systématiquement une estimation de l'incertitude associée aux données acquises et observations effectuées dans les bases de données.

La quantification de l'amplitude de l'aléa et de son évolution sur des gammes d'échelles spatiale et temporelle plus larges reste un enjeu majeur. En ce sens, l'association des données spatiales à celles des observatoires *in situ* est primordiale. Les nouvelles missions spatiales et l'accès à de nouvelles données satellitaires représentent une opportunité dont il faut tirer profit. Le développement de capteurs à bas coût offrant une meilleure résolution spatiale est également une voie d'amélioration de la connaissance. La collecte, l'analyse et la modélisation de séries de données sur des échelles de temps long, identifiées lors des précédentes prospectives, doivent être poursuivies afin d'avancer dans l'analyse de la non-stationnarité des phénomènes et des risques (liés au changement global, au climat ou à d'autres causalités: variabilité « naturelle », combinaison de non-stationnarités complexes, comportements des populations, gouvernance des systèmes, etc.). Le succès de ces recherches à forts enjeux sociétaux dépend de la constance des moyens attribués à la recherche.

La compréhension des évolutions des risques environnementaux invite à une vision élargie de l'observation mettant en synergie les données quantitatives (e.g., mesures *in*

*situ* et de laboratoire, réanalyses et prévisions), qualitatives (e.g., enquêtes, observations d'impacts pour l'évaluation des risques associés) et les données provenant de nouveaux types de capteurs (e.g., capteurs citoyens, archives non conventionnelles [*proxies*, sources historiques, archives paléo-environnementales, etc.]). La co-localisation de ces observations multi- et interdisciplinaires est un enjeu majeur.

Par ailleurs, il est important d'avoir accès à cette diversité de données via un guichet unique permettant d'éviter les redondances ou a minima de disposer d'un catalogue, ce que devraient permettre de réaliser à terme les pôles de données et de services nationaux. S'appropriier les données disponibles par ailleurs et les abonder en retour est particulièrement encouragé. Nous pensons ici plus particulièrement à Copernicus, pour lequel la communauté appelle à un meilleur accompagnement par l'INSU pour accéder, contribuer et enrichir cette base d'informations multidisciplinaires. Il conviendrait également d'atténuer les difficultés d'accès aux données publiques en lien avec la RGPD, notamment post-catastrophes.

Enfin, la massification des données implique en retour de pouvoir analyser et assimiler efficacement des données denses, spatialement et temporellement. L'assimilation de données -ou combinaison de modèles et d'observations- a été et continue d'être un grand facteur de progrès pour la qualité des prévisions numériques. L'intelligence artificielle sera amenée à jouer un rôle croissant dans le traitement des données acquises dans un contexte d'aléas et de risques. Que ce soit pour le stockage ou le traitement des données, ceci nécessite de disposer non seulement des ressources informatiques adéquates mais aussi et surtout de nouvelles expertises scientifiques et techniques, et de pouvoir former le personnel en poste. Il est important de mieux faire connaître et diffuser les méthodes performantes existantes: techniques d'analyse de données et de systèmes, outils de visualisation en grande dimension, schémas numériques performants, outils logiciels, IA... qui peuvent apporter une réelle plus-value scientifique mais dont l'usage n'est pas encore généralisé. Le portail unique de données, même s'il représente une certaine praticité, ne peut être considéré à lui seul comme le graal. Il convient de renforcer, voire parfois de développer, les liens entre programmes de recherche et tâches d'observation pour augmenter les interactions entre les deux communautés parfois encore trop séparées. On peut par exemple imaginer des observations permettant de mieux identifier les gammes d'échelles dans lesquelles les modèles sont fiables. Pour développer cette synergie, les lieux d'échanges et de rencontres entre modélisateurs et observateurs (notamment au sein des IR, des ZA ou des

OSU, par exemple...) sont indispensables, avec l'absolue nécessité d'aller vers une animation et des programmes scientifiques allant au-delà de la communauté INSU.

### **NOUVELLES MÉTHODES POUR LA QUANTIFICATION DES RISQUES, LEUR PROBABILITÉ D'OCCURRENCE ET OBSERVATIONS ASSOCIÉS ; ÉVÉNEMENTS RARES, THÉORIES PROBABILISTES (VALEURS EXTRÊMES, VARIABILITÉ...), CONJONCTION DES RISQUES**

Les précédents exercices de prospective de l'INSU ont souligné, dans le contexte du changement global, la diversité des échelles spatio-temporelles et des questions de recherche à résoudre se rapportant à l'étude des événements rares et/ou extrêmes. Ils ont mis en avant certains besoins : une meilleure connaissance des mécanismes à l'origine des changements et la réduction des incertitudes des modèles de prévision, susceptibles d'être obtenus par l'allongement des séries de données, de réseaux de mesures *in situ* plus denses, et l'intégration des facteurs de vulnérabilité.

Les travaux et projets de recherche concernant les risques s'appuient essentiellement sur des réseaux d'observations et de mesures. D'un projet à un autre cependant, changer de site d'observation peut s'avérer à la fois compliqué et coûteux, ce qui milite en faveur de déploiements de systèmes d'observations colocalisés avec des réseaux déjà en place, en étendant leurs capacités. Cette stratégie ne doit pas sous-estimer la charge de travail nécessaire à l'entretien et à la veille des appareils installés. Les Services nationaux d'observation (SNO) constituent le cadre général des missions d'observation de l'INSU. Leur périmètre pourrait être renforcé, y compris au niveau européen, pour pérenniser les réseaux de manière efficace. Par ailleurs, les observatoires régionaux voient leur intérêt fortement grandir du fait de la part de plus en plus importante des financements apportés par des collectivités territoriales. L'articulation avec les SNO de l'INSU gagnerait à être améliorée, au moins du point de vue de la documentation et de la diffusion des données produites. Plus généralement, une approche « multi-partenaires » serait intéressante à développer dans le cadre de réseaux d'observations inter-instituts, notamment avec des « Zones ateliers » de l'INEE. La directive européenne *Open data* s'inscrit aussi dans cette perspective.

Pour franchir des seuils significatifs dans la compréhension des phénomènes, l'augmentation de la densité des réseaux de mesures doit également s'accompagner d'un accroissement de la durée des observations (pour tous types de données), ce qui soulève à nouveau le problème récurrent de la pérennité des réseaux d'observations et de mesures, ainsi

que leur documentation et leur accessibilité / lisibilité. Ces objectifs sont aujourd'hui progressivement intégrés dans les constructions des infrastructures de recherche nationales et européennes, et dans celles des pôles de données et de services. L'historicité des données pose aussi la question de l'intégration de données *proxy* aux séries de données existantes, pour en allonger le recul temporel indispensable à l'étude et à l'analyse des événements extrêmes (et aussi pour une meilleure appréciation des questions de vulnérabilité et de résilience). La calibration de ces données et les méthodes statistiques adéquates pour les analyser nécessitent en particulier des collaborations avec des chercheurs de l'INEE et de l'INSHS pour le montage de projets bilatéraux. La constitution de bases de données historiques impliquerait des collaborations avec de nombreux partenaires dont des historiens, le BRGM, EDF... Il convient, pour ces problématiques également, de promouvoir les échanges et les interactions avec des chercheurs venant d'horizons et de disciplines différents. L'analyse des observations et données associées aux événements rares et/ou extrêmes suppose avant tout, d'un point de vue méthodologique, un consensus sur la définition de tels événements et la recherche de la probabilité d'occurrence de ceux-ci. En appui du développement de méthodes statistiques adéquates, dont certaines sont nouvelles, la modélisation stochastique et les procédés de *machine learning* mériteraient d'être développés, du fait de leur intérêt potentiellement très prometteur pour l'analyse simultanée et combinée des données instrumentales et *proxy*. En particulier, l'intelligence artificielle et les réseaux neuronaux devraient constituer des outils adaptés aux analyses à effectuer sur des grosses bases de données, par exemple les analyses multivariées, et surtout, l'analyse des incertitudes. En effet, les intervalles de prédiction et le faible nombre d'événements concernés, même sur de longues périodes, demeurent encore des obstacles à la fiabilité des résultats et des interprétations. Le problème des pondérations dépendant du temps pourrait ainsi, peut-être, être résolu grâce à ces méthodes novatrices.

Recommandations :

- Pour être efficaces, ces nouvelles méthodes exigent une grande puissance d'extraction des données, qui est d'abord indispensable pour les tester. La maîtrise de ces méthodes implique ensuite une connaissance approfondie des données nécessitant des collaborations interdisciplinaires qui doivent être renforcées. Comme l'expertise est encore rare dans ce domaine technique, elle doit être encouragée par l'INSU, par le recrutement de personnels spécialisés pour optimiser ce travail et/ou disposant d'une double compétence (interdisciplinarité entre plusieurs instituts du CNRS).

- La quantification du coût environnemental lié à l'utilisation de moyens informatiques importants (moyens de calculs, stockage et utilisation de données, exploitation en ligne) devrait être encouragée.

### **TRAJECTOIRES DE VULNÉRABILITÉ DES SOCIO-ÉCOSYSTÈMES (SANTÉ, ALIMENTATION, EAU, BIODIVERSITÉ); SUPPORT À LA DÉFINITION DE STRATÉGIES D'ADAPTATION RELEVANT DES SCIENCES DU VIVANT ET DES SCIENCES SOCIALES (RÉSILIENCE)**

La vulnérabilité des socio-écosystèmes apparaît de plus en plus critique dans le contexte du changement global. La définition des stratégies d'adaptation est devenue un enjeu majeur pour la communauté scientifique au regard des besoins et des attentes de la société.

L'étude des interactions société-environnement doit être définie en tenant compte des conditions d'instabilité et d'incertitudes toujours croissantes auxquelles nous sommes désormais soumis. A ce titre, il est nécessaire d'identifier les éléments des socio-écosystèmes et les règles de fonctionnement qui gouvernent les interactions à différentes échelles et entre les échelles. Le problème peut être traité de manière inter- et transdisciplinaire afin de répondre à trois enjeux majeurs :

- Identifier dans les systèmes humains et écologiques les facteurs de contrôle et leur variabilité, élaborer des indicateurs pour définir les états désirés ou non, et mettre en œuvre des moyens de mesures fiables pour évaluer et comparer les processus ;
- Accroître nos capacités de prédiction en prenant en compte le temps long, les différentes échelles d'analyse ainsi que les effets cascades à différents niveaux d'organisation ;
- Élaborer les réponses adaptatives des sociétés humaines aux différentes échelles de temps et d'espace, tout en étant vigilant sur les possibles instrumentalisation politiques et idéologiques du concept de résilience.

Les enjeux décrits ci-dessus doivent être traités en considérant les deux points suivants :

- Il est impératif de prendre en compte les dynamiques démographiques et leurs points de rupture aux différentes échelles, comme forçage, au même titre que le changement climatique, mais aussi comme processus interne aux socio-écosystèmes. Il faut pour cela définir les échelles de temps et d'espace pertinentes, en considérant l'échelle globale mais également les dynamiques spatiales locales aux échelles de temps journalières à annuelles qui sont moins étudiées ;
- Le second point concerne les relations entre la communauté scientifique et les responsables politiques qui sont les décisionnaires finaux pour le financement des programmes de recherche, la co-construction des plans d'étude et la diffusion des résultats pour faciliter leur ap-

propriation et leur mise en œuvre sur les territoires.

Il apparaît désormais nécessaire d'adopter une démarche transversale entre les différents instituts du CNRS (INEE, INSU, INSHS) pour mener une recherche efficace sur la vulnérabilité des socio-écosystèmes, en s'appuyant sur des approches disciplinaires fortes et en travaillant de manière interdisciplinaire aux interfaces. La synergie peut être promue en développant sur le temps long des programmes ancrés sur les territoires et qui permettent les échanges entre les différentes disciplines, en vue notamment de la co-construction de projets répondant aux besoins sociétaux. La mise en œuvre d'une telle démarche transversale requiert du temps et une constance dans les orientations de la programmation de la recherche pour faire émerger des collaborations durables.

### **RÉSOLUTIONS SPATIALE ET TEMPORELLE POUR ÉTUDIER L'IMPACT DE CHANGEMENTS GLOBAUX À L'ÉCHELLE DE TERRITOIRES (ET VERROUS MÉTHODOLOGIQUES ASSOCIÉS)**

La question des résolutions spatiale et temporelle dans le contexte de l'étude des risques environnementaux est évoquée dans la Prospective Surfaces et interfaces continentales (2018) et dans la Prospective Terre solide (2018). Il y est notamment souligné l'importance d'une observation multi- et interdisciplinaire avec une co-localisation d'observations long terme et d'observations d'impacts. Certaines mesures prioritaires y sont évoquées :

- Constituer des bases de données historiques sur les aléas et les impacts associés et développer des méthodes adaptées à leur exploitation ;
- Développer des approches multi-échelles pour identifier les événements extrêmes aux échelles des impacts associés ;
- Augmenter la résolution spatiale et temporelle des calculs tout en complexifiant la physique prise en compte dans les modèles ;
- Pérenniser l'acquisition des données sur le long terme.

Lors du présent atelier, les recommandations suivantes ont été formulées :

- L'étude des phénomènes (aléas) bénéficie d'observations et de modèles numériques à haute résolution spatiale et temporelle. Cependant, pour l'étude des risques, l'accroissement de la résolution (notamment spatiale) n'est pas une fin en soi. Par exemple, les modèles de complexité intermédiaire peuvent s'avérer très fructueux à l'échelle du territoire.
- L'accroissement de la résolution spatio-temporelle des modèles doit aller de pair avec celle des observations, notamment pour conduire les indispensables évaluations des modèles et permettre l'assimilation de données.
- L'observation et la modélisation des composantes des risques environnementaux (aléa, exposition et vulnérabilité) doit se faire à des résolutions spatiales et temporelles compatibles et inter-opérables.

- Il faut travailler à l'articulation/emboîtement d'échelles spatiales et temporelles pour l'analyse des risques environnementaux dans les territoires, éventuellement en faisant appel à des maillages non structurés.
- Il est crucial de pérenniser l'observation de long terme pour les phénomènes rares ou à évolution lente, et exploiter le potentiel des approches à plus haute résolution spatiale et temporelle, éventuellement en les combinant. Cette analyse de long terme requiert des moyens humains durables (C/EC & ITA; OSU & UMR).

### INTÉGRATION DES INCERTITUDES ET DE LA VARIABILITÉ (MODÈLES ET OBSERVATIONS) MULTI-ÉCHELLES DANS LES PROJECTIONS

Les méthodes de prévision et de caractérisation des risques sont multiples, et vont des prévisions déterministes à la prédétermination probabiliste, de plus en plus croisées avec des projections climatiques. Toutes reposent fortement sur des synergies entre modèles et observations, et les discussions ont mis en avant les recommandations suivantes en ce qui concerne les incertitudes :

- Un point fondamental est d'améliorer la caractérisation de la structure (spatio-temporelle) des erreurs, qu'il s'agisse des erreurs des observations comme de celles des modèles. Cette approche est importante pour l'assimilation de données, la qualification des données et l'évaluation des modèles, qui doit tenir compte de ces structures d'erreur.
- En ce qui concerne plus spécifiquement les modèles, les incertitudes sont souvent réduites en augmentant leur contenu physique (moins de « paramétrisations »), avec l'inconvénient de demander généralement des résolutions spatio-temporelles plus fines, et des temps de calcul plus importants (voir la question scientifique précédente consacrée aux résolutions spatiale et temporelle); la modélisation intégrée nécessaire pour aborder le caractère souvent multifactoriel des aléas et de la vulnérabilité impose des couplages de modèles le plus souvent par le biais de conditions aux limites, qui sont sources d'incertitudes. Des approches entièrement couplées plus précises

émergent mais requièrent des capacités de calcul plus importantes.

- Un point de vigilance particulier est lié au caractère transitoire des évolutions de l'environnement et des structures socio-économiques (à considérer pour leur vulnérabilité et comme sources de pressions). Cette non stationnarité implique de nombreuses précautions: adapter l'usage des modèles qui supposent la stationnarité, soit par construction, soit par le paramétrage; renforcer l'observation et les réanalyses à long-terme, et ce d'autant plus que les processus sont rares et/ou variables (pour caractériser l'éventuelle significativité des tendances et des changements de variabilité); évaluer la capacité des modèles à reproduire les tendances significatives; questionner les seuils d'alerte (quand/comment ont-ils été définis, sont-ils toujours effectifs?)
- Les projections climatiques sont porteuses d'incertitudes particulières, à cause de la variabilité interne et des scénarios de forçages radiatifs. Dans ce cadre, il faut rappeler l'importance des approches d'ensemble (multi-modèles, multi-scénarios) pour caractériser les incertitudes et les changements plus ou moins robustes. On peut aussi souligner l'évaluation de plus en plus large des modèles de climat (multi-variables et multi-critères), et la tendance à l'augmentation du réalisme de ces outils avec CMIP6. Les pistes de réduction des incertitudes utiles pour l'évaluation des risques environnementaux incluent la probabilisation des scénarios de forçage (par exemple, le scénario +1.5°C considéré comme peu probable par l'assistance).
- Les données de la sphère SHS sont cruciales pour estimer la vulnérabilité, l'exposition, attribuer les tendances passées, scénariser les tendances futures. La formalisation, même grossière, de possibles rétroactions climat/risques/gestion des territoires est encouragée (ex: déplacements de populations pour éviter les canicules, ou développement de l'irrigation face à la sécheresse).
- Si la caractérisation des incertitudes est essentielle pour une science rigoureuse, elle doit aussi servir à mettre en avant des points de certitude, qui, quand ils existent, devraient être privilégiés dans la phase de dissémination de la science (problème des incertitudes paralysantes).

## 2. Recommandations

### MOYENS À METTRE EN ŒUVRE

Lors de l'atelier, plusieurs suggestions ont été portées par l'assemblée. La question de l'affichage explicite des notions d'aléas et de risques naturels dans les sections du CNRS a été évoquée, il en ressort la perception que ces termes sont peut-être sous-représentés (notamment dans les descriptions des sections de l'INSU). Le groupe de prospective suggère de porter une politique plus volontariste, autant sur l'affichage explicite les termes « Aléas » et « Risques » dans les descriptifs des sections que dans les recrutements effectifs de chercheurs et chercheuses. Sur le plan des recrutements, le groupe de prospective note un risque de pression excessive sur la section 52, qui ne peut pas accommoder complètement l'absence de recrutement « risques » et « aléas » dans les autres sections.

À la vue de la dynamique scientifique autour des notions de risques, nous proposons d'initier une prospective inter-institut au niveau CNRS, plutôt qu'au niveau INSU.

L'INSU se positionne fortement sur l'aléa, notamment via le travail sur les phénomènes (observation, modélisation). Le travail d'observation est une clé essentielle dans la compréhension des phénomènes. La force de travail est aussi un verrou potentiel. Nous notons qu'environ 50% des tâches d'observation sont effectuées par des chercheurs/enseignants chercheurs non-CNAP. Ce travail étant peu, ou difficilement valorisé, il pourrait être suggéré que l'INSU contribue à mieux valoriser les tâches d'observations chez les chercheurs CNRS et se fasse, avec d'autres, le porte-voix (lobbying) les Enseignants-Chercheurs, notamment pour viser à un allègement des services d'enseignement pour les personnels universitaires non-CNAP.

Une réflexion sur le recensement des GDR impliquant « risques » a été menée, et nous observons qu'ils sont très peu nombreux. Il y a un besoin de structurer la communauté risques de façon plus pérenne pour permettre aux communautés de se côtoyer sur des temps longs. Nous avons évoqué la possibilité de relancer un GIS Risques (<https://journals.openedition.org/histoire-cnrs/1527>).

### COLLABORATIONS AVEC D'AUTRES INSTITUTS ET AVEC D'AUTRES PARTENAIRES

Les participants notent que les laboratoires INSU et les Observatoires travaillent prioritairement sur l'Aléas (et pas nécessairement sur l'ensemble de la chaîne Risque), avec une ligne forte autour de la compréhension des processus, les observations, le suivi des phénomènes, l'identification de précurseurs et la mise en place de prototype de dispositif d'alerte. Les actions autour de la vulnérabilité sont limitées,

et reposent souvent sur un besoin de collaborations vers les autres instituts du CNRS, et vers d'autres opérateurs de l'état ou du secteur privé (assurances, sous-traitants pour les donateurs d'ordre tels que les bureaux d'étude du secteur privé). Observant l'existence de nombreuses prospectives en cours ou déjà réalisées sur le même thème, les participants suggèrent de ne pas multiplier les prospectives mais de se rapprocher des travaux et groupes existants. On pourra par exemple suggérer que l'INSU encourage (dans les deux sens) les liens avec le groupe Terre solide, Allenvi (qui agit de façon plus large que la problématique Risque), dans lequel les chercheurs INSU sont en très petit nombre. La mission de l'Alliance nationale: être force de proposition pour les appels à projets (ANR, Belmont Forum, Horizon Europe), aider pour les réponses aux saisines ministérielles, structurer les thématiques, axes de recherches, promouvoir les collaborations. Un partage de l'information au sein des unités de l'INSU est peut-être à renforcer concernant ALLenvi ?

Pour synthétiser, les participants ont formulé une série de proposition d'actions :

- Encourager l'INSU à contribuer encore plus aux démarches déjà existantes multi-instituts et multi-organismes, type Get Allenvi ou Athena (SHS) pour promouvoir les programmes « Risque ».
- Renforcer la recherche et développement sur les systèmes d'alerte (au titre des prototypes), pour lesquels des collaborations avec le secteur privé et/ou les acteurs opérationnels peuvent être directes.
- Renforcer les liens avec les territoires: par exemple au niveau des OSU, renforcer les liens avec les acteurs régionaux et locaux tels que les organismes d'experts (CEREMA, INERIS, DREAL, BRGM...)
- Dans un contexte d'émergence de nombreux projets régionaux (type « maison des risques »), l'INSU pourrait se positionner comme le lieu où structurer les initiatives, éviter (ou limiter) les doublons ou la dispersion des projets.
- L'INSU pourrait favoriser encore plus l'écoute des demandes/besoins des opérateurs privés (dispositif LabCom, thèses CIFRE, compagnies d'assurances) en maintenant une certaine indépendance et une distance des lieux de décision.

### OUTILS DU FUTUR

Comme le futur lointain nous est inconnu, les débats se sont orientés vers un futur modérément proche. Les préconisations émises lors des exercices récents de prospectives thématiques restent entièrement d'actualité, avec quelques mises à jour, extensions et commentaires motivés par les développements de ces derniers mois ou années. L'appréciation et la quantification des risques sont ainsi

indissociables d'une augmentation importante des données d'observation sur des gammes d'échelles spatiales et temporelles plus vastes, permises à la fois par la montée en puissance et la couverture accrue des observations satellitaires (Copernicus...), et par le déploiement de réseaux denses de capteurs *in situ* dédiés, en partie facilité par des coûts unitaires en diminution. La population elle-même constitue un réseau participatif primordial car elle est très largement équipée en smartphones et très présente sur les réseaux sociaux. Elle peut, de ce fait, dépasser dans certaines situations les performances des réseaux conventionnels d'instruments, à l'instar de l'application LastQuake pour la détection et la localisation des tremblements de Terre.

La colocalisation d'observations multidisciplinaires est un élément indispensable à la compréhension des couplages multi-physiques qui caractérisent la plupart des risques naturels. Le corpus de données acquises est destiné à alimenter les infrastructures de recherche (IR) en lien avec les risques (EPOS, ACTRIS, ICOS, eLTER, AnaEE...) ainsi que les pôles nationaux de données et de services (AERIS, ForM@Ter, ODATIS, THEIA) pour un accès intégré aux données via l'IR Data Terra en cours de construction. A leur tour, ces bases de données fourniront les informations requises pour des modélisations globales et intégrées permettant d'étudier les interactions et rétroactions complexes entre les différents compartiments et phénomènes mis en jeu.

Des développements théoriques et de nouvelles approches de modélisation et d'analyse des données seront nécessaires pour une meilleure prise en compte des caractères non linéaires, multi-échelles et stochastiques des phénomènes (par exemple par des simulations d'ensemble, des paramétrisations stochastiques...), éventuellement modulés par des considérations d'exposition des individus aux risques. Les techniques d'intelligence artificielle (IA) sont appelées à jouer un rôle important dans ces développements, même s'il y a un risque à penser que l'IA pourrait répondre à de nombreuses questions car cette perception pourrait amener certains organismes à réduire leurs financements. La collecte des données est naturellement un préalable à tous les travaux sur le *big data*. Il apparaît aussi qu'il est urgent de faire tomber les barrières entre des modèles s'adressant à des applications voisines, et que le travail collaboratif doit être amplifié.

Parmi les instruments jugés indispensables pour acquérir des données dans les situations de risques naturels, les drones présentent de nombreux avantages, malgré leurs contraintes réglementaires : coût modéré, couverture des terrains à haute résolution, et mise en sécurité des personnes. Les systèmes expérimentaux méso-échelles, inter-

médiaires entre les dispositifs de laboratoire et les déploiements de terrain, sont également jugés importants pour l'étude des risques. Bien souvent cependant, ces systèmes sont délicats à maintenir sur le long terme car ils reposent de manière critique sur des ressources humaines et la jouvence des équipements est difficile à financer. Enfin, l'empreinte carbone de la fabrication et du déploiement massif de capteurs, et celle des grands centres de stockage et de calcul pour le *big data* doit être évaluée. Faudra-t-il envisager de se restreindre sur ces aspects ?

Les compétences du futur dans le domaine de ce défi seront forcément transverses et nécessiteront de conserver un système de recherche motivé par la curiosité, par l'exploration des chemins de traverses, et qui ne repose pas complètement sur une stratégie de « consolidation ».

Au niveau de l'enseignement supérieur, la formation devra reposer sur un socle spécifique fort tout en développant des approches interdisciplinaires tout à fait complémentaires (associant des unités d'enseignement majeures et mineures). Mise en place dans le cycle LMD au moment du choix de master avec plus de pertinence, elle permettra ensuite de meilleurs ponts entre les disciplines. Le développement et/ou le renforcement de la pluridisciplinarité et de l'interdisciplinarité des formations pourront s'appuyer sur une meilleure intégration de la production des connaissances et pratiques de la recherche aux filières de formation. Cette intégration pourra être encouragée dès le niveau de licence et pourra être partiellement assurée par les nouvelles propositions d'EUR.

L'attraction pour nos disciplines scientifiques devra continuer à se travailler et s'amplifier dès le niveau de l'enseignement secondaire par l'intermédiaire par exemple de la Maison de la Science ou de la Main à la Pâte. La communauté des chercheurs de l'INSU s'inquiète de la réforme du programme d'enseignement susceptible d'entraîner la disparition de ses disciplines fondamentales de base dans le parcours des lycéens et futurs étudiants.

Les discussions dans le cadre de ce défi ont montré que les changements globaux allaient générer un nombre croissant de crises environnementales à gérer pour lesquelles nos formations doivent préparer les futurs gestionnaires.

# Défi 6

Interactions  
entre cycles longs  
et cycles courts  
pour la mise  
en place  
des ressources

**Comité scientifique :** C. Robin, Ph. Boulvais, O. Bour, O. Dauteuil, A. Dia, J.R. de Dreuzy, B. Guillaume, F. Guillocheau, M. Jolivet, D. Lague et Ph. Steer, Olivier Vidal, Laurent Jammes, Isabelle Moretti, Corinne Leyval, Michel Cathelineau, Elsa Cortijo, Frédéric Cappa, Karim Benzerara.



La répartition des ressources à la surface de la Terre, leur volume et leurs qualités sont le résultat de processus géologiques complexes interagissant à des échelles de temps très variées, impliquant entre autres des cycles bio-géochimiques ayant conduit à la mise en place de ces réserves. Les ressources ont été par ailleurs fortement impactées depuis plusieurs millénaires par les activités anthropiques avec des incidences sur l'eau, les sols, les ressources minérales et énergétiques, renouvelables ou non, biodiversité. Étudier les flux et couplages des processus géologiques (voir biologiques - lien avec le défi 7) à l'origine de ces ressources, dans un environnement dynamique où ces processus interagissent sur différentes échelles de temps, de l'échelle anthropique à celle de plusieurs millions d'années est une thématique incontournable pour la communauté des sciences de la Terre dans les années à venir.

Lorsque l'on parle de ressources, une distinction est alors nécessaire et importante à faire entre l'objet géologique (l'anomalie géochimique=gisement, le réservoir, l'aquifère, etc.) et son usage sociétal. L'usage sociétal va se tourner vers différents objets géologiques (ressources primaires) bien sûr mais également vers des ressources secondaires (mine urbaine et recyclage, agromine), que le géologue peut caractériser de la même manière. Le centrage sur l'objet géologique va permettre de discuter du système Terre à différentes échelles de temps et d'espace, en transversalité d'enveloppes géologiques et de méthodologies/disciplines utilisées. Le centrage vers l'usage va aller sur la chaîne de valeur depuis l'exploration jusqu'à la remédiation en passant par l'exploitation de la ressource, son traitement, tout en intégrant les aspects sociétaux (acceptabilité, géopolitique, économie).

Il nous faut également faire la distinction entre ressources et réserves, ce qui nous amène d'ailleurs à distinguer recherche partenariale et recherche appliquée. La confusion est courante. L'INSU doit revendiquer la nécessité d'une recherche scientifique en amont, dans le cadre de la géolocalisation des ressources. L'INSU doit affirmer son rôle central dans cette recherche qui doit devenir l'argument central de planification de l'État. Cette recherche doit être un outil mis à disposition du public, des scientifiques, des industriels et des décideurs administratifs ou politiques, produisant des données d'observation fiables, labellisées et compréhensibles. Nos programmes de recherche doivent intégrer toute la chaîne de valeur (depuis l'exploration jusqu'à la remédiation en passant par l'exploitation de la ressource, son traitement, tout en intégrant les aspects sociétaux: acceptabilité, géopolitique, économie) ainsi que le lien réserves-coûts-énergie. Toute recherche doit intégrer la caractérisation et le suivi des impacts socio-économiques de l'exploitation de ces ressources sur les populations locales.

Cette thématique Ressources, intrinsèquement multidisciplinaire, doit être centrale à l'échelle de l'INSU, interrogeant la dynamique tellurique, les changements climatiques, la biosphère et écosystèmes. Cependant ce terme Ressources sous-entend par définition une approche anthropique de processus géologiques. Ces études doivent intégrer l'ensemble de la chaîne de valeurs de la formation de la ressource à son exploitation, recyclage et aux processus de remédiation suite à son exploitation. Ce Défi est donc au cœur de la transition écologique et énergétique.

Il s'agit également de bien définir les ressources dont on parle : ressources minérales, énergétiques, mais aussi le sol et l'eau (et la biodiversité), ressources dont les cycles de formation et d'évolution sont très différents, et sur lesquelles l'anthropisation a plus ou moins d'impact.

# 1. Enjeux et questionnements scientifiques

## LES SAUTS D'ÉCHELLE, UN VERROU AU CŒUR DES RECHERCHES SUR LES RESSOURCES : DES TEMPS LONGS AUX TEMPS COURTS, MAIS AUSSI DU MINÉRAL À LA TERRE

- La compréhension des processus et de l'hétérogénéité des données demande à descendre aux plus petites échelles. Mais l'intégration à l'échelle du système Terre dans son cadre géodynamique et climatique est également nécessaire. L'*upscaling* est un verrou commun (se rapprocher du défi 17, travailler avec les informaticiens et les mathématiciens). Par contre les échelles caractéristiques peuvent être différentes d'une ressource à l'autre ;
- Pour les échelles de temps: notion d'héritage, de *typing points* ;
- De la *data* au modèle, entre autres à l'échelle Terre: la gestion de nos données dans le cadre du *Big Data*. En particulier nos données incomplètes, avec des incertitudes, non équilibrées: un challenge pour nos collègues mathématiciens et numériciens !
- Enjeu sur le changement d'échelle entre les analyses mesures / effectuées ponctuellement en laboratoire (analyse *in situ* géochimique sur lame mince, analyses pétrophysique sur plug, en CTscan...) et l'échelle du réservoir puis du bassin. Ouverture sur la communauté des mathématiciens ? Impact sur les modélisations thermo-hydro-mécaniques et implication sur la prédictibilité des ressources (géothermie...);
- Évolution dans le temps et cyclicité i) facteurs de concentration des métaux, processus cycliques versus processus uniques exemple: évaporation sur des milliers de km<sup>2</sup> de l'eau de mer, et production généralisée d'évaporites, à comparer avec la distribution actuelle des sebkhas dont l'ampleur actuelle est ridicule. Les stocks de ligands (chlore) mobilisables ne sont donc pas les mêmes dans le temps ii) pour rester sur la chlorinité et la chimie de l'eau de mer: variations cycliques des ratios cationiques et impacts sur la chimie des saumures primaires et secondaires ;
- Prédictibilité: comment améliorer les approches statistiques spatialisées mais également les approches par modélisations numériques de type THMC ? Prise en compte des géométries réelles 3D avec leurs topologies complexes. Comment mieux réussir le changement d'échelle entre la perméabilité mesurée en laboratoire et la connectivité sédimentaire des corps réservoirs à l'échelle kilométrique. Comment mieux arriver à homogénéiser les coefficients efficaces comme la porosité, la perméa-

bilité, la déformation mécanique (tenseur de Gassman et coefficient de Biot) ou la dispersion thermique effective par des équations valables en tout point pour les constituants fluides et solides (question autour du changement d'échelle) ? Intégration des modèles THMC de réservoir dans le management du risque (lien avec les *traffic light system*) – existe-t-il des boucles de rétroactions sur l'exploitation du réservoir ?

## SPÉCIFICITÉ DE L'APPROCHE ANTHROPIQUE SUR LA QUESTION DES RESSOURCES

- L'Homme suit la ressource mais l'Homme relocalise la réserve
- Approvisionnement des pré- et proto-industries en roches, minerais, bois, l'exemple de la paléoméallurgie, domestication des céréales et sols
- Impact de la disponibilité des ressources sur l'évolution des sociétés

## RESSOURCES MINÉRALES

Concernant la genèse des métaux :

- Ressources métalliques pour la transition écologique et énergétique: métaux dits « critiques » ;
- Interaction fluides-roches-déformation et formation de gisements de ressources métalliques dont reconstruction hydrodynamique des systèmes hydrothermaux minéralisés ;
- Impact des changements globaux (climatiques et anthropiques) mais également tectoniques, sur la genèse et la répartition des ressources, afin de mieux prédire la localisation de ces dernières mais également de mieux caractériser leurs caractéristiques intrinsèques ;
- Interactions entre processus de surface (érosion, sédimentation) contrôlés par le climat (et sa cyclicité) et les processus tectoniques à différentes échelles de temps (*rifting*, orogenèse, magmatisme, cycle de Wilson, cyclicité des failles). Impact sur la distribution des réservoirs (eau, HC, géothermale), les roches mères, le sel, etc. Impact sur la circulation des fluides, les régimes thermiques ;
- Rôle de la déformation planétaire, c'est à dire l'évolution géodynamique et thermique de la Terre depuis la tectonique précambrienne dominée par les panaches mantelliques à la tectonique des plaques phanérozoïque contrôlant la distribution des gisements métallogéniques en espace et en temps. Les cycles de Wilson contrôlent la formation et la préservation des ressources naturelles par concentration des énergies thermiques et mécaniques

- surtout autour des limites de plaque ;
- Évolution des plaques sur les systèmes métallogéniques, rôle relatif des déformations à grande longueur d'onde (exemple ouverture de l'Atlantique et impact sur les continents sous tous les angles, géomorphologie, climat, flux de chaleur, mouvements de fluides entre aquifères) par rapport aux déformations localisées ;
  - Évolution du style de déformation, réactivité ensuite en mode cassant (*sag deformation*, verticale, vs autres modes de *shear zones* par la suite) : facteurs régulant ces déformations, répétabilité des styles de déformation ou dans certains cas style unique à une période). Cela contrôle les mouvements de fluides et les dépôts ultérieurs. En particulier, lors des phases tectoniques en divergence ou en extension, comment les grandes structures crustales comme les détachements (failles normales à faible pendage) mettent en relation différents réservoirs de fluides (océan, météorique, bassin, magmatique et métamorphique). En contexte continental, le long de ces structures, des eaux météoriques percolent profondément dans la croûte en permettant précipitation et/ou remobilisation de métaux (Or, U...). En contexte océanique, au niveau des dorsales lentes ou bien des marges ultra-aminées, ces détachements accommodent l'exhumation du manteau et provoque une large part de sa serpentinitisation par de l'eau de mer. Ces structures sont également des contrôles majeurs dans l'hydrodynamique des fumeurs noirs et blancs sur substrat serpentiniteux, événements hydrothermaux riches en sulfures et en volatils réduits (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>). L'hydrodynamique de ces détachements et des nombreux retours fluide/roche/perméabilité n'est pas encore comprise, encore moins en 3D, peut-être car il n'y a pas d'unicité d'un seul modèle ?
  - Même problème avec l'interface de subduction dans les zones de convergence : la géométrie du plan en barrières et aspérités est un reflet, une cause et une conséquence de son hydrodynamique. Comprendre comment la déformation impose les tenseurs de perméabilité et les gradients de pression dans le plan, hors du plan ou vers le plan permet de modéliser les flux de fluides ;
  - Incorporer les mécanismes producteurs et consommateurs de fluides (deserpentinitisation/ serpentinitisation, décarbonatation, fusion) avec leur impact sur le bilan de fluide mais aussi sur les propriétés de la roche encaissante : dilatation, contraction, changement de porosité, de perméabilité, transfert de contrainte ;
  - Rôle des gradients hydrauliques causés par une topographie dynamique sur la genèse (piégeage) des ressources minérales ? En d'autres termes la fréquence de variation de la topographie a-t-elle une influence sur la localisation/formation des dépôts minéraux économiques ? Interactions géomorphologie/flux de fluides/ressources en eau et minéraux ;
  - Processus magmatiques et métamorphiques permettant les enrichissements (fractionnement *mx/melt*...) et en lien fort ;
  - Ressources liées aux systèmes magmatiques. Comprendre spatialement et temporellement un système magmatique et ses interactions avec l'encaissant ;
  - Recyclage des ressources au cours des temps géologiques / événements géologiques : temps court (séisme) à temps long (orogénèse) voire très long (craton) et courte distance vs longue distance ;
  - Cycles très court : impact des microséismes sur la précipitation des métaux en solution due à la fluctuation de la pression (exemple de l'or orogénique). Définir leur capacité des ruptures à endommager la roche et à modifier ses propriétés à long terme. Autour de la micro-sismicité mais aussi avec les grands séismes qui peuvent rompre au-delà de la zone sismogénique et connecter les réservoirs profonds et superficiels ;
  - Rôle de la sismicité dans les concentrations et remobilisations uranifères sur les gisements de type discordance : les séismes ne sont-ils pas les déclencheurs des instabilités convectives à l'interface bassin socle ;
  - Paléoclimat, paléo-océanographie, chimie des eaux et concentrations minérales ;
  - Cycle géochimiques et facteurs de concentration ;
  - Métallogénèse, innovation dans l'acquisition des paramètres contrôlant mobilité et dépôt des métaux ;
  - La modélisation numérique du transport réactif et du dépôt à différentes échelles (du bassin ou du socle à l'échelle de la fissure ou du réservoir) ;
  - La détermination de l'origine des fluides, et de l'origine de leur migration (flux de chaleur profonds, intrusions...) ;
  - Fréquence des flux de fluides : pulsatiles chenalisés vs continus pervasifs... à quelle échelle de temps ? cycle long orogénique vs cycle court hydrothermal ? d'où peut-on réellement utiliser les ressources comme traceurs de l'évolution crustale ?
  - Cycles courts : Cycle naturels vs cycles anthropiques sur les transferts de masse (métaux) entre compartiments (sol, eau, plantes, produits, déchets) ;
  - Métaux de la transition sont souvent des métaux coproduits d'autres métaux (Cu, Fe, Pb, Zn...) : pourquoi certains gisements de Cu ou Pb-Zn ont des petits métaux économiquement exploitables alors que d'autres non ? = cycle de ces « petits » métaux stratégiques.
- Au sujet de l'importance de la datation des processus :
- Importance de la datation : datation, durée et résidence des circulations de fluides au sein des réservoirs profonds et aquifères, datation des événements à l'origine des changements physico-chimiques des roches (cimentation, concentration en éléments, dissolution...) / enjeux sur la prédiction des réservoirs / des ressources ;
  - L'enregistrement du temps est essentiel pour contraindre la cyclicité des processus naturelles à haute résolution. Nécessité de datations les plus précises possibles à différentes échelles de temps et pour différentes périodes du temps géologique. Bilan d'expertise en France ? « La communau-

te française dans le domaine de la géochronologie et de la stratigraphie apparaît peu structurée» (Défis 3 et 4).

Concernant les risques associés à l'exploitation de ces ressources :

- Risques associés à l'exploitation des ressources (par exemple aléas sismiques liés aux exploitations minières) ;
- Étude des risques liés à l'exploitation des géoressources via la dispersion des métaux lourds dans l'environnement (caractérisation des sites, (bio)monitoring, etc.) et compréhension des mécanismes de transfert en jeu ;
- Impacts sur l'environnement (compartiments sol, air, eaux de surface et plantes) et la santé humaine ;
- Risques associés à l'exploitation des ressources (par exemple aléas sismiques liés aux exploitations minières) (CO) sismicité induite/sismicité déclenchée; développement de réseaux de surveillance participatifs (impliquant les citoyens) ;
- Comment instaurer des technologies propres dès l'exploitation, la prospection et la mise en œuvre de l'exploitation minière - du point de vue social et environnemental ;
- Autres facteurs de risque liés à l'exploitation : dégazage d'hydrogène, méthane, CO<sub>2</sub> etc. dans certains environnements. Exemples : Zones de forte serpentinisation, roches hyperalcalines (typiquement riches en métaux rares critiques); cas des mines de phosphate et métaux rares dans la péninsule de Kola (Russie) ;
- Impacts anthropique et climatique sur la déstabilisation des massifs (glissements de terrain, événements climatiques extrêmes) ou effondrements du sol par effet de sur-exploitation des nappes ou des gisements du sous-sol.

Au sujet de la valorisation et du recyclage des ressources :

- Envisager les « nouvelles » ressources : seconde mine (mine urbaine), recyclage (électronique, scories, boues de lavage, etc.), valorisation des délaissés (par exemple, friches industrielles), les nouveaux usages (biomasse pour l'énergie) ;
- Problématique des déchets et autres rejets (recyclage, valorisation, contaminations, etc.) qui font partie du « cycle » eux aussi ;
- Métrologie et traçage de contaminants émergents qui sont aussi des métaux critiques ;
- Approvisionnement durable en métaux critiques, à la base de nouvelles technologies liées à la transition énergétique. Recyclage des métaux critiques (comme les terres rares, notamment les légères et les lourdes, les platinoïdes comme les Au, Pd, Pt ou le Sc, le W ou le Nb à partir de déchets (déchets urbains, électroniques, pots catalytiques, boues de stations d'épuration...)) ;
- Traçabilité des ressources ;
- Caractérisation minéralogique spatialement résolue en laboratoire et avec outils de caractérisation portable (Raman, LIBS, IR, XRF, FTIR etc.).

Concernant les ressources et l'histoire des sociétés :

- Impact de la disponibilité des ressources minérales sur l'évolution des sociétés
- Approvisionnement des pré- et proto-industries en roches et minerais
- Interactions avec les sciences sociales et impacts de l'exploitation des ressources sur les conditions de vie, habitudes et état sanitaire des populations : perception des dangers, acceptation sociale et évaluation des risques
- Notions de ressources et usages / stockages et ressources / exploitation des ressources et usages / acceptabilité sociale
- Différences entre ressources et ressources exploitables soit ce dont on a besoin pour la transition écologique
- Cycle long cycle court entre la formation des ressources (ex : sables et granulats et ressources minières) et leur recyclage d'où les notions d'usage et de stockage
- Enjeux d'exploitation / quantité de ressources vraiment accessibles / rapidité de production de la ressource / enjeux de leur exploitation / quantité de ressources exploitées / débit et capacité / injectivité et productivité / enjeux de confinement
- Travail de veille et de modélisation sur toute la chaîne de valeur de scénarisation (consommations de ressources et transitions énergétiques)
- Construire les arguments pour les sources des ressources primaires ou non / relocalisation de la ressource

## RÉSERVOIRS

La description pétrophysique et géomécanique des structures de porosité et des interactions fluides-roches (eau, air, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) est nécessaire pour décrire, comprendre et modéliser la distribution et les circulations des fluides profonds, pour une gestion durable des aquifères profonds, l'exploitation des ressources géothermiques, ou modéliser la mobilité d'éléments tels que le lithium ou l'uranium. Cela passera également par l'expérimentation de la porosité et de la perméabilité et de sa dynamique (fonctions de déformation et réactions fluide/minéral). La prédiction de la localisation des sédiments et le dimensionnement des hétérogénéités associées (au niveau des réservoirs/aquifères et couvertures/aquitards) afin de pouvoir construire des modèles pour le stockage géologique des énergies renouvelables ou du CO<sub>2</sub>, la recherche de nouveaux types de gisement de sable.

Concernant la caractérisation de la porosité :

- La ressource : le vide intergranulaire, la porosité quel que soit le fluide associé !
- Caractérisation de l'état de surface de la matrice rocheuse et évolution de la porosité ;
- Le transport et les processus réactionnels en milieu poreux et hétérogène / Structures de circulations des fluides / Le rôle des interfaces (recharge et décharge) et interactions surface-profond / Relations entre les diffé-

rents compartiments et avec les contaminants;

- Mieux définir les notions de Pression, Température et temps de ces systèmes et caractériser l'impact de l'état de contrainte (déviateur, pression de fluide, pression « solide ») sur les propriétés des roches (perméabilité...);
- Caractériser l'impact des phénomènes au temps long sur les propriétés courts termes et vice versa (endommagement, *annealing*, recristallisation...);
- Incorporer les déformations aux échelles de temps intermédiaires (tremors, *slowquakes*) dans les modèles de transferts de fluide (*suction pump*, *fault valve*).

Le cas critique des ressources en eau :

- Fonctionnement hydrogéologique en soi, distribution des écoulements, des solutés et construction d'un signal agrégé qui va de manière hétérogène temporellement, contribuer aux autres systèmes de surface notamment
- Changements climatiques et pression anthropique sur la ressource en eau + les conflits d'usages / La prise en compte des aquifères dans les modèles globaux à l'échelle continentale (notamment via la modélisation numérique) / Vitesse de déstabilisation des milieux
- Cycles climatique-tectonique jouent un rôle clé dans la distribution de l'eau douce, par exemple la mousson en Inde - liée à la dynamique de l'Himalaya.
- Paléohydrologie des systèmes minéralisés: très difficile d'avoir des idées des ordres de grandeur: nécessité de discussion avec des communautés spécialisées dans le domaine + expérimentation
- Le transport et les processus réactionnels en milieu poreux et hétérogènes
- Le rôle des interfaces (recharge et décharge) et interactions surface-profond
- La vie dans les aquifères (diversité microbienne) et l'aspect fonctionnels (leur rôle sur les flux géochimiques)
- Changements climatiques et pression anthropique sur la ressource en eau + les conflits d'usages
- La prise en compte des aquifères dans les modèles globaux (notamment via la modélisation numérique)
- Comment gérer, simuler, prédire et réduire les conflits potentiels d'utilisation de la ressource en eau (eau potable versus eau chaude ou stockage)?
- le rôle de l'eau profonde du sous-sol, comme outil de la transition énergétique: l'eau profonde vue comme une géoressource minière plurielle: couplage géothermie électrogène et production de chaleur, géothermie et hydrogène natif, géothermie et lithium, géothermie et stockage de CO<sub>2</sub>, production et stockage de chaleur, de biogaz, etc.; accroître la connaissance sur les questions d'exploitations couplées des ressources multiples associées à l'eau profonde et la possible interaction avec les réservoirs d'eau potable; la question de la transition des connaissances et des savoir-faire des domaines pétroliers vers les énergies renouvelables du sous-sol; le développement de sites pilotes (géothermie profonde, lithium, hydrogène natif,

stockage de chaleur en milieu fracturé, les spécificités des sites urbains, etc.); gestion et distribution des données du sous-sol en dehors du domaine pétrolier.

- Qualité et ressource en eau: quantité, impacts anthropique et climatique induit par la surexploitation des nappes (augmentation de la population) et de la diminution de la recharge (modification du climat et de l'occupation du sol / diminution des surfaces perméables) - Qualité: Suivi en temps réel de la qualité des eaux (développement de sondes en continu et suivi *low cost* / Enjeux sur certains contaminants non traités par les stations (ex: Antibiotiques et antibiorésistance)
- Enjeux sur la durée de la recharge des ressources souterraines et sur le stress hydrique (durée de recharge < durée d'exploitation => diminution de la quantité de la ressource)
- Les HYdroBIOGEosystèmes et leurs interactions / la zone critique: étude des flux, des cycles, de leur dynamique, des couplages biotique - abiotique, des interactions physiques, chimiques et biologiques aux interfaces, sous l'influence de forçages à la fois climatiques et anthropiques
- Écotoxicité des contaminants d'origine naturelle ou anthropique la dynamique du cycle de l'eau dans la complexité de ses mécanismes, des flux d'échanges et des couplages entre les compartiments des surfaces continentales et leurs interfaces (océan, atmosphère) a été soulignée. Les flux hydriques sur les surfaces et interfaces continentales restent trop souvent étudiés par morceau, en raison: de la multiplicité des compartiments hydrologiques avec des temps caractéristiques, des mécanismes et des processus très variables, et d'une physique généralement bien comprise à l'échelle locale mais, difficile à paramétrer aux échelles pertinentes de fonctionnement de l'ensemble de l'hydrosystème.
- Suivi en continu de la MO dans les eaux avec des mesures optiques: indicateur de l'infiltration rapide dans les aquifères fracturés/karstiques et/ou indicateur de qualité des eaux (eaux de surface et souterraines)

Concernant les développements méthodologiques:

- Géo-ingénierie
- Boom des capteurs, de la métrologie et donc gestion *Big data*
- Et cela pour l'eau, la géothermie, stockage du CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> naturel (ou non)

## GRANULATS, MINÉRAIS INDUSTRIELS ET MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Certains points ici convergent avec certaines conclusions issues des ateliers du défi 7, essentiellement autour du cycle des minéraux stratégiques et des ressources pédologiques.

La biosphère à l'origine des concentrations minérales:

- Développer la géobiologie, la géomicrobiologie;

- Le rôle de la biosphère dans les processus étudiés: les interactions minéral-vivant, par ex. les interactions bactéries-fluides-roches dans la diagénèse et la métallogénèse, évaluer le rôle de la biodiversité dans les cycles des principaux éléments chimiques, rôle de catalyseurs, rôle dans les processus de concentration, décrire les mécanismes biotiques et abiotiques en jeu dans le stockage des éléments;
  - Le cas particulier des ressources phosphatées. Comment se forment des dépôts sédimentaires comme les phosphorites alors qu'il n'y a pas de phosphore en domaine marin. Concentrations révélant une très grande diversité biogéochimique;
  - La vie dans les aquifères (diversité microbienne) et l'aspect fonctionnels (leur rôle sur les flux géochimiques);
  - Processus modulés par les conditions environnementales comme l'oxygénation – impact sur l'activité enzymatique – caractérisation cofacteurs – et donc rôle entre climat et bio-minéralisation à l'échelle des temps géologiques et de leurs variabilités climatiques;
  - Géomicrobiologie;
  - Le vivant catalyse de nombreuses réactions géochimiques, mais ne peut pas seulement s'appréhender sous sa dimension chimique;
  - Quelle est quantitativement la dépendance des cycles géochimiques de surface (C, N, Si, Fe, Cu, Zn, Ca etc.) vis-à-vis de la diversité biologique/microbienne;
  - Quelle est la taille du réservoir biologique au sein des lithosphères (biosphère profonde)? Et les flux de matière et d'énergie échangés avec ce réservoir? ...;
  - Géo-hydro-écosystèmes;
  - En commun avec défi 03-04: cycles biogéochimiques et ressources, Diagénèse, Grands événements oxydiques ou anoxiques et Matière organique ou métaux (Fe, Ur etc.);
  - Notion de transfert des métaux entre les différentes enveloppes géologiques mais également vers l'écosystème;
  - Caractérisation des *hot spots* réactionnels et *hot moments*;
  - La biodiversité est aussi une ressource précieuse.
- Phytoremédiation / Phytomanagement / nouvelles ressources associées:
- L'utilité de la biosphère dans les procédés de remédiation des sites industriels ou miniers;
  - Comportement et devenir des nanoparticules dans les environnements de surface, contaminants émergents et écotoxicologie;
  - Nanométrie, caractérisation physico-chimique, rôle des propriétés de surface et impact avec les ressources (eau, sol, biodiversité) des nanoparticules naturelles, manufacturées ou anthropiques non-intentionnelles; à la fois polluants émergents pour les nanoparticules d'origine anthropique et vecteurs de contaminants métalliques ou organiques (Effet cheval de Troie);
  - Impact sur les ressources en eau, sol et biodiversité des AMD: gestion et remédiation;
  - Restauration des sols et des zones impactées: stabilisation par la végétation, limitation des transferts;
  - Exploration minière par l'enregistrement biologique (exemple les termitières en Afrique.
- Sols et matière organique
- Qualité des sols et stockage de MO
  - La matière organique en tant que constituant élémentaire des sols et des eaux
  - Relations sol et sous-sol
  - Variabilité de la diversité microbienne dans les aquifères de socle sous agriculture
  - Gestion et protection de la ressource « sols » dont les sols urbains

## 2. Recommandations

### STRUCTURATION

- Une communauté pas assez identifiée, des efforts importants mais dispersés à l'échelle nationale
- Dispersion de la communauté sur beaucoup de sites selon les ressources, parfois problèmes de taille critique
- L'échelle des OSUs importante (par ex rôle des observatoires volcaniques comme zone atelier)
- Continuer à décroquer la communauté INSU sur ces thématiques
- Un travail inter-instituts (INC génie chimique, INEE, INSHS (acceptabilité sociétale), INSIS ingénierie des processus, INSMI *upscaling*, INP hydraulique: il faut constituer un projet à l'échelle du CNRS sur ces questions en affirmant le leadership de l'INSU)
- Coordination avec nos autres partenaires publics nationaux: BRGM, CEA, IRSN, IFPeN, IFREMER, ADEME, INRAEE, Géodénergies, IRD, CNRT
- Ne pas oublier les Alliances inter-organismes (Allenvi et ANCRE) (AD) mais quels leviers ont ces alliances sur le financement de la recherche ?
- Info: lancement d'un projet sur les ressources marines avec l'IFREMER (quid d'un programme équivalent au programme allemand ou japonais?) – ne pas couper la communauté ressources en plusieurs sous-groupes
- Nécessité de travailler avec communauté SHS pour acceptabilité sociétale / explication de l'utilité actuelle des ressources et de notre totale dépendance demandant un ressourcement local
- Communauté à créer, en particulier avec EPIC et industriels pour nous donner plus de poids, plus d'idées et de force de frappe: travail à faire par le CNRS par exemple.
- Aller voir ce qui se fait ailleurs: travail à faire par groupe gouvernement-CNRS-industriel-chercheur (veille proactive)
- Nécessité de travailler en transversalité entre différentes communautés INSU (ASAM)
- Dialoguer aussi au-delà du CEA et de l'IPFEN avec l'IRSN concernant les radionucléides et leur cycle de vie dans l'environnement (AD)
- Dialoguer avec l'INRAE sur la préservation de la ressource en sol en contexte de changement global (Initiative 4 pour mille) (AD)
- Interagir avec l'INSHS pour intégrer toute la chaîne d'analyse des questions, notamment l'acceptation sociétale (AD)
- Interagir avec l'INEE sur les questions de trajectoires environnementales, de dynamiques spatio-temporelles des écosystèmes et des interactions Ressource Eau- Ressource Sol-Ressource Biodiversité

- Interagir avec l'INC et l'INSIS pour le développement de (bio)capteurs bas coûts, haute fréquence de monitoring de la qualité des ressources (Eau, Sol) de la zone Critique (AD).

### FINANCEMENTS

- Dans le cadre de la nouvelle programmation de l'INSU en cinq grands types de projets, proposer la question des Ressources comme un défi transverse, qui pourrait être abordé de manière complémentaire par les différents programmes (CESSUR, EC2CO...)
- Sensibiliser la MITI à la nécessité de montage d'actions programmatiques interdisciplinaires sur la question des ressources sensu lato
- Rôle des Labex importants
- Créer une échelle intermédiaire de financement de la recherche entre le CT Tellus et l'ANR avant d'aller à l'Europe très présente sur ces thématiques
- Recréer des GDRs avec nos partenaires industriels (attention les filières nationales sont en difficulté car on ne touche plus au sous-sol en France – réforme du code minier bloquée)
- Créer un appel d'offre interdisciplinaire autour des ressources avec les autres instituts du CNRS et nos partenaires industriels, afin de permettre d'identifier un budget récurrent capable d'assurer une vraie politique de recherche à l'échelle nationale sur cette thématique.

### ZONES-ATELIERS ET NOUVELLES COMPÉTENCES

- Colocaliser les méthodes: importance des zones-ateliers et autres infrastructures de recherche: de nouveaux ateliers à cibler à quel stade par rapport à la ressource? Notion d'état-zéro et des conditions initiales avant travaux sur des sites d'exploration, d'exploitation et de réhabilitation
- Développements méthodologiques: (collaboration avec Défi 16, milieux extrêmes)
  - Faire venir le laboratoire sur le terrain, méthodes non invasives
  - L'imagerie 3D à haute résolution des croûtes continentale et océanique (tomographie électrique, bruit sismique) pour la localisation des porteurs de métaux (dont les Terres Rares) et des ressources en matériaux de construction.
  - Données satellitaires par exemple sur les ressources en eau
  - Métrologie et traçage de contaminants émergents qui sont aussi des métaux critiques

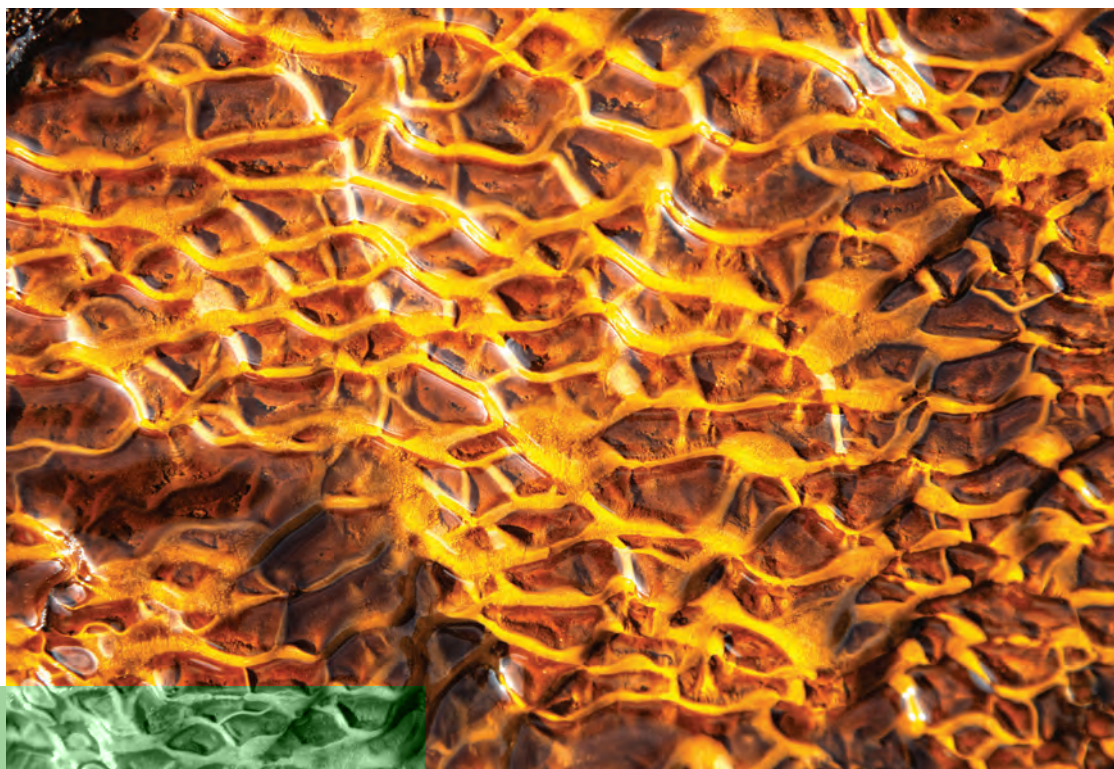
- Définition d'âges et de durées des processus: machine permettant des analyses de plus petites quantités de matériel avec plus de précision (attention néanmoins au saut d'échelle)
- Détermination des conditions passées de formation avec notions d'ordre de grandeur de taille/vitesse/durée/paléohydrologie mal contraintes ne permettant pas des modélisations aussi pertinentes que nécessaires, iv) de modélisation v) d'approches mathématiques, en particulier sur des grosses quantités de données
- Caractérisation minéralogique spatialement résolue en laboratoire et avec outils de caractérisation portable (Raman, LIBS, IR, XRF, FTIR etc.)
- Utilisation de méthodes *in situ* de caractérisation sur site => amener le laboratoire sur le terrain et non pas l'échantillon au laboratoire pour minimiser les impacts des prélèvements sur l'environnement
- Géochimie et minéralogie analytique (isotopie et élémentaire), sur roche totale et spatialement résolu (cartographies, inclusions), multi technique dont techniques synchrotrons (microscopie électronique MEB / sonde / MET, diffraction X, ICP-MS, ablation laser, multi-collection, spectro LIBS)
- Améliorer les codes couplés de type THMC en particulier en entrant (i) les données thermodynamiques pour des

gammes plus élevées de température et (ii) établir une fonction perméabilité valables pour les différents taux de déformation et réactivité chimique du milieu poreux

- Intelligence artificielle et indices minéralogiques pour la prospection mais aussi le traitement des minerais
- Forages miniers / accès à du matériel profond à jamais inaccessible sinon /bénéfice double accès à du matériel et à des processus / exemple sans oxydation / 3-4 km /

## RESSOURCES HUMAINES

- Nouveaux métiers et sauver des anciennes spécialités: géologie et métallogénie, géométallurgie, paléohydrologie, reconnaissance de l'approche Ressources quelle que soit la spécialité
- Lever la réticence des sections du CN à recruter des profils dits «appliqués», voir interdisciplinaires pourtant clés pour le développement de ces thématiques: génie chimique et géosciences, biologie et géosciences, etc.
- Paléohydrogéologues
- *big data*/mathématique (groupes miniers sont parmi les plus gros producteurs de données en masse mais n'en font pas grand-chose)
- il nous faut favoriser les formations transverses / comment favoriser des formations double-compétence?



Sabine DESPRATS BOLOGNA/GET/CNRS Photothèque

# Défi 7

Rôle du vivant  
dans les cycles  
biogéochimiques  
et sur la mise  
en place  
des ressources

**Comité scientifique:** Isabelle Basile Doelsch, Karim Benzerara, Magali Gerino, Lionel Guidi, Laurent Memery, Emma Michaud, Cécile Robon, Olivier Rouxel, Géraldine Sarthou.



Pour des raisons faciles à comprendre, la frontière entre les différents défis est parfois difficile à définir. Cela est particulièrement vérifié pour tout ce qui concerne les échelles de temps: du fait de l'existence des défis 3 et 4, s'intéressant aux longues échelles de temps et aux crises environnementales, le défi 7 n'a pas réellement abordé les cycles BGC sur de grandes échelles de temps climatiques et géologiques. L'atelier du défi 7 s'est articulé autour de 4 groupes de réflexion, qui se sont penchés sur les problématiques scientifiques prioritaires, associées à quelques enjeux plus spécifiques, qui doivent être abordées dans les années à venir. Deux questions essentielles, qui dépassent le défi 7, consubstantielles aux sciences de l'environnement et de la terre, ont émergé des discussions :

- Ancien et toujours d'actualité, le premier concerne les interactions/intégrations d'échelles. Il se décline en deux volets: la résolution et le couplage des échelles. Que ce soit dans la dimension spatiale (hétérogénéité des sols, paysages, côtes, sédiments, etc.), la dimension temporelle (événements/accidents et accumulation d'événements, etc.), la dimension structurelle (individus vs population vs communauté vs écosystème, etc.), la prise en compte des 'petites' échelles vers les plus grandes échelles constituent un enjeu majeur. Par ailleurs, les flux et échanges, donc les stocks, résultent de processus non linéaires couplés, i.e. que les petites échelles impactent généralement l'état moyen d'un système. La question de l'*upscaling* reste encore totalement ouverte. Elle peut être prise en compte par des paramétrisations dans les modèles. Cependant, celles-ci sont pour la plupart *ad hoc* et ne sont pas nécessairement fondées sur une connaissance fine des processus aux bonnes échelles (exemple: paramétrisation/calibration locale pour application globale).
- Le deuxième enjeu concerne les observations. Non seulement elles deviennent de plus en plus nombreuses et volumineuses pour certaines d'entre elles, mais elles sont aussi extrêmement hétérogènes quant à leur distribution spatio-temporelle et à leur qualité / type. L'utilisation de ces données passe par l'émergence d'une nouvelle science associée au *big data*, qui devient prépondérante en sciences de l'environnement. Cependant, au-delà du volume, un jeu de données, pouvant par exemple provenir d'expérimentations exploratoires innovantes ou d'études de terrain ciblées, peut contenir une information critique et contraignante, mais nécessairement imparfaite, sans pour autant être volumineux (données biologiques vs données physiques classiques): il est essentiel d'intégrer ce type de données plus ponctuelles dans les études intégrées utilisant les jeux de données volumineux.



Jean Louis CHEMINEE/CNRS Photothèque

# 1. Enjeux scientifiques thématiques

## CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES ET BIODIVERSITÉ

- Évaluer le rôle de la biodiversité fonctionnelle (génétique, spécifique, communautaire, etc.) dans les cycles. Exemple: mixotrophie, chimioautotrophie, etc. Quel niveau de complexité? Rôle des virus?
- Coupler les différents cycles: prendre en compte la 'biologie' (métabolisme) dans une approche stoechiométrique;
- Appréhender l'importance des interactions biotiques dans les cycles BGC;
- Inscire les processus d'adaptation (fonction) /évolution (taxonomie) dans les cycles. Sur quelles échelles de temps?
- Quantifier la production de l'inorganique par le vivant;
- Estimer les flux biogéochimiques à l'aide de l'outil moléculaire (biodiversité « fonctionnelle » métabolique)
- Être en mesure de prévoir les points de bascule, de changement de régime dans un système complexe, potentiellement chaotique.

## LES PETITES ÉCHELLES (CELLULE, PARTICULE, COLLOÏDES)

### Biominéralisation (médiation par le vivant de la synthèse de minéraux)

- Décrire les divers processus de biominéralisation cellulaires, ainsi qu'extra cellulaires
- Interpréter les *proxies* associés à la biominéralisation révélateurs d'évolutions passées de la 'vie'
- Comprendre les processus régulant la silicification des organismes (non seulement diatomées photosynthétiques, mais aussi éponges, radiolaires), dont le rôle de la phagocytose
- Quantifier le rôle du pH et du potentiel redox sur la formation des carbonates et sur le cycle de *proxies*, comme le bore

### Interfaces minéral/vivant

- Décrire le rôle des microorganismes et bactéries sur les processus d'altération des phases minérales
- Quantifier l'impact de la faune sur les ressources des sols et sédiments (bioturbation, etc.)
- Évaluer l'impact des organismes symbiotiques (comme les champignons)
- Comprendre les relations particules/matière organique (absorption/désorption, (co)précipitation, etc.)
- Quantifier l'importance de la phase colloïdale et la biodisponibilité des éléments trace

## Réactions redox

- Comprendre les processus redox au niveau de la cellule et les fractionnements isotopiques associés (par exemple Fe(II)/Fe(III))
- Quantifier les gradients des oscillations redox et leur impact
- Décrire les voies métaboliques d'organismes spécifiques, telles que les mixotrophes ou les chimolithotrophes Fractionnement isotopique
- Effectuer le lien individus (laboratoire = processus) / système (observations = bilan des processus)
- Fermer le bilan isotopique de certains éléments (Mercure), remis en question par exemple par le programme GEOTRACES (Nickel)
- Calibrer les *proxies* en déconvoluant le rôle des différents processus régulant le fractionnement isotopique, en le couplant avec la spéciation

## LES INTERFACES

### Biofilms

- Quantifier le rôle des biofilms, en particulier l'impact sur les symbioses.
- Décrire les gradients biogéochimiques au sein de ces biofilms.

### Lithosphère et sources hydrothermales

- Quantifier l'importance des flux hydrothermaux sur le bilan des cycles (puits/sources)
- Estimer la production biologique (énergie chimique)
- Évaluer l'impact de la matière organique dans la stabilisation (dont biodisponibilité) de certains éléments essentiels
- Estimer la formation des ressources minérales et leur précipitation
- Décrire les interactions entre fluide et roche
- Appréhender la biosphère profonde et le lien avec la lithosphère

### Atmosphère

- Décrire la micro couche à la surface de l'océan et comprendre les processus de transformation de matière associés
- Quantifier l'importance des aérosols et poussières sur les cycles BGC
- Estimer le rôle de l'activité biologique sur les dépôts/émissions d'aérosols
- Quantifier l'impact des événements extrêmes sur la dynamique d'échanges avec l'atmosphère

## Cryosphère

- Quantifier le rôle de la glace sur les flux au sein des rivières, lacs et océans
- Décrire l'hétérogénéité de la glace de mer et son impact sur les flux
- Comprendre les processus régulant les cycles BGC au sein du permafrost, en particulier dans le cadre du changement climatique
- Décrire les processus en jeu lors de la nuit polaire au sein de l'océan.
- Quantifier l'impact des algues sympagiques sur les flux et l'apport d'énergie au benthos
- Estimer l'évolution de la cryosphère dans le cadre du changement climatique et des flux BGC associés

## Sédiments/Zone critique

- Décrire les mécanismes biotiques et abiotiques en jeu dans le stockage des éléments (diagénèse et altération des sols), dont l'impact du vivant sur la dynamique des sols et sédiments
- Étudier le couplage des éléments dans les sédiments, dont les liens entre bioaltération des silicates et piégeage des carbonates
- Comprendre l'importance de la déoxygénation sur les processus sédimentaires et dans la zone critique
- Quantifier les apports d'énergie et de matière alimentant les sédiments marins et lacustres (couplage pelagos benthos), et l'impact de ces apports sur le fonctionnement de l'écosystème benthique
- Quantifier l'impact de la bioturbation végétale et animale, de la bioirrigation sur la diagénèse
- Prendre en compte la problématique de l'occupation des sols dans l'évolution des sédiments marins et de la zone critique

## Continuum Terre-Mer. Lien avec défi 10

- Estimer les flux océan – continent (dans les deux sens) et entre compartiments biotique et abiotique le long du continuum
- Décrire le fonctionnement et l'impact sur les cycles BGC de systèmes spécifiques, comme le filtre/réacteur « estuariens », la complexité de la zone intertidale (dont mangroves) ou le rôle des *Submarine Groundwater Discharges* (SGD)
- Quantifier l'effet de l'érosion sur les processus chimiques et biologiques (bassins versants, traits de côte, marges)
- Quantifier l'impact de l'activité biologique sur la prévention de l'érosion
- Définir la résilience des écosystèmes le long du continuum
- Comprendre l'impact de l'anthropisation et détecter les points de bascule

## LES RESSOURCES

L'approche des ressources par le prisme des cycles BGC induit deux questionnements fondamentaux, à savoir :

- Quels sont les processus géobiologiques responsables de la formation/altération des ressources ?
- Quel est l'impact de l'exploitation des ressources sur les cycles (globaux/locaux) ?

C'est ce double questionnement générique qui est sous-jacent aux réflexions menées par le groupe de travail. Cela implique par exemple que les échanges ont avant tout porté sur les conditions favorables à la disponibilité d'une quantité suffisante et de « qualité » de la matière organique des sols plutôt que sur les différentes ressources agricoles, forestières, etc. elles-mêmes. Notons par ailleurs qu'il y a un certain nombre de points qui est partagé avec les groupes précédents, en particulier avec les interfaces.

## Qualité des sols et stockage de MO (non renouvelables à l'échelle de temps humaine)

- Décrire les mécanismes et micro-organismes contrôlant le continuum de biodégradation (jusqu'à la minéralisation) de la MO
- Comprendre le rôle des interactions organo-minéral / métaux sur la stabilité de la MO
- Quantifier les liens entre productivité de la MO, processus redox, transformation de la MO (comme suffurisation) et efficacité du piégeage de MO dans les sédiments
- Comprendre les conséquences de la déstabilisation de la MO sur le fonctionnement des communautés microbiennes
- Évaluer l'impact du changement climatique sur les flux de minéralisation de la MO
- Quantifier l'impact combiné du changement climatique et de l'usage des sols sur l'évolution à moyen et long terme de la pédogenèse et des stocks de C.

## Qualité de l'eau

- Appréhender la propagation d'un contaminant au sein d'un cycle biogéochimique
- Décrire le cycle de vie des contaminants et l'impact toxicologique de ces différentes formes de cycle de vie
- Prendre en compte les polluants émergents, les virus et les bactéries ainsi que les effets « cocktail » de contaminants combinés
- Connaître et quantifier les conditions de développement d'efflorescence d'algues toxiques
- Déterminer des niveaux de qualité d'eau en adéquation avec l'usage visé pour optimiser la circularité de la ressource (« Reuse »)

## Cycle des métaux stratégiques

- Connaître les catalyseurs de la mobilisation/concentration des métaux et les processus associés
- Adapter ces processus au développement de méthodologies d'extraction douce pour optimiser leur recyclage
- Développer des recherches dans les environnements contaminés ou hydrothermaux

## 2. Recommandations

### ENJEUX SCIENTIFIQUES

Deux recommandations génériques qui dépassent le défi 7 ont été émises :

- Soutenir activement la synergie émergente entre sciences *big data* et sciences de la terre, par l'utilisation de méthodes nouvelles en mathématiques et informatique pour gérer les données et les liens observations/modèles (paramétrisation), en particulier par le développement d'outils associés à l'Intelligence Artificielle et l'assimilation de données. Intégrer et optimiser les informations des données plus « rares », à fort potentiel, dans ces approches.
- Encourager les études effectivement ciblées sur l'intégration d'échelles (incluant calibration/paramétrisation), en particulier le lien entre expérimentation de laboratoire / mésocosmes en milieu naturel / sites - observations locales / échelle globale.

En relation avec ces problématiques générales, plusieurs recommandations plus ciblées doivent aussi être considérées :

- Poursuivre la mise au point de capteurs haute fréquence associés à des plateformes autonomes de longue durée et aller vers un échantillonnage haute fréquence du vivant
- Lever les verrous concernant les milieux difficiles à échantillonner (océan profond – sources hydrothermales, milieux polaires, micro couche de la surface océanique, biofilms, etc.)
- Développer la technologie dédiée à la « très petite échelle » (nano) (hétérogénéité, processus) : nanosims avec marquage, nanotomographie et synchrotron, met nano, etc.
- Stabiliser et pérenniser les systèmes d'observations, associés à une standardisation et interopérabilité des bases de données, avec la prise en compte du vivant (et de l'Homme)
- Poursuivre les mesures 'classiques' (chimie, biodiversité, isotopie, etc.) Pour la continuité des observations, tout en utilisant les nouvelles approches complémentaires ('omics', etc.)
- Résoudre la question essentielle de la stabilisation de l'échantillon entre acquisition et mesure (espèces métabolites, état physiologique, etc.)
- Développer l'expérimentation et l'observation dans les milieux fortement anthropisés ; considérer les échelles intermédiaires (mésocosmes) permettant d'étudier des systèmes minéral/vivant contrôlés
- Progresser dans la connaissance des processus affectant les échanges entre dissous, colloïdal et particules
- Lever le verrou associé aux approches expérimentales

multi stress (température, ph, contaminants, etc.)

- Développer des méthodes permettant de relier approche moléculaire et flux biogéochimiques (métabolisme)
- Progresser sur la représentation des processus d'interactions non linéaires, potentiellement responsables de bascules (*tipping points*)
- Favoriser le développement et l'utilisation de modèles de complexité variable.

### INTERDISCIPLINARITÉ

L'interdisciplinarité se développe et existe bien au sein du CNRS, cela malgré de nombreux freins institutionnels. Les critères opérationnels de l'interdisciplinarité au CNRS sont presque exclusivement administratifs : ils se basent souvent sur des initiatives qui doivent être proposées par plusieurs unités et soutenues par plusieurs Instituts (cf. thèse Prime|80, projets de la MITI, etc.), le CNRS étant agencé autour de ces Instituts structurellement cloisonnés et souvent en compétition vis-à-vis des ressources. Les CID avaient été conçues pour pallier certains de ces défauts et favoriser l'interdisciplinarité, réduite ici à une collaboration entre Instituts. Cependant, de nombreux Instituts ne jouant pas le jeu et la composition des CID étant dépendante des sections disciplinaires, rattachées à des Instituts, les CID ne fonctionnent pas de manière optimale.

La communauté INSU est dans une situation assez contradictoire. En effet, cette communauté ne part pas de rien et l'interdisciplinarité fait partie de la culture des chercheurs et équipes rattachés à l'INSU : au sein de l'INSU, les équipes/disciplines se rencontrent souvent autour de l'étude croisée d'un même « objet » (continuum terre-mer, sources hydrothermales, pompe biologique du carbone océanique, pédogénèse, etc.). En fait, cette interdisciplinarité se fait naturellement au sein de chaque Institut du CNRS et souvent au sein de chaque laboratoire/OSU/site. Il en est de même de partenariats avec des partenaires institutionnels (IRD, Inrae, Ifremer, etc.), bien que les coopérations deviennent plus difficiles avec certains d'entre eux qu'auparavant (généralement pour des raisons de politique institutionnelle au sein des organismes). Cependant, d'une manière un peu paradoxale, l'exercice de prospective de l'INSU a montré que les interactions entre les différents domaines de l'INSU ne sont pas nécessairement très développées et que les différents programmes de l'INSU sont très compartimentés.

- Consolider (avec les moyens associés) les OSUs et les plateformes, « outils » favorisant échanges et pluridisciplinarité
- Développer des programmes entre domaines au sein de l'INSU, tout en gardant un espace pour des recherches

plus spécifiques et disciplinaires

- Mettre en place des actions communes avec certains Instituts (INEE, INS2I, INSHS, etc.)
- Développer les GDR, en particulier inter organismes, et modifier leur mode de fonctionnement (en particulier, permettre un roulement plus actif)
- Modifier le fonctionnement des CID (sections à part entière, avec un comité indépendant des autres sections et possibilité d'évaluer la carrière des chercheurs, affectation des postes sur un contingent spécifique, hors Instituts)
- Modifier les critères de l'interdisciplinarité dans l'évaluation des projets, en s'affranchissant de règles purement administratives (multi UMR et/ou pluri Instituts)
- Permettre la mise en œuvre de programmes effectivement pluri disciplinaires, dont le budget et la durée dépassent ceux d'un projet l'ANR (cela demande une collaboration entre organismes, comme par le passé, et une voie de financement autre que l'appel à projets classique type ANR). Quel rôle pour ALLENI ?

## LES MOYENS

- Financement. Soutenir les études à risque ou innovantes – pré ANR (augmenter le budget labos ? programmes INSU ?)
- Financement. Créer un palier intermédiaire entre les programmes INSU et l'ANR (parfois localement considéré par des actions au sein des structures du PIA : serait-ce une solution satisfaisante ?)
- Moyens humains. Palier au déficit de plus en plus criant et délétère en ingénieurs/techniciens dans les laboratoires, observatoires et plateformes
- Structure. Donner plus de visibilité et de disponibilité aux plateformes nationales
- Structure. Simplifier la procédure concernant la flotte, en particulier le lien entre ANR et programmation de la flotte, ainsi que le nombre de dossiers et évaluations indépendantes (manque de cohérence et saut d'obstacles)

## LES MÉTIERS

Certains métiers nécessaires à la recherche 'INSU' existent dans d'autres Instituts, mais les postes ne sont pas nécessairement focalisés sur les thématiques INSU. Exemples : bioinformaticien à l'INEE ou INSB, ou modélisation en Intelligence Artificielle (INS2I). Les collaborations ne sont pas toujours la panacée lorsque les besoins de la communauté INSU sont importants et que les priorités scientifiques ne sont pas partagées avec les autres Instituts. Ceci pose la question de la gestion des ressources au CNRS d'une part, et du manque de visibilité de ce qui existe déjà d'autre part, ainsi que de la nécessité de croiser les demandes des autres disciplines/domaines du CNRS.

Le besoin majeur, totalement dans le cœur des thématiques de l'INSU, concerne des *data scientists* pour gérer, organiser, analyser le *big data* (autres que satellites ou modèles : imagerie, biodiversité, capteurs, etc.), en relation avec des questionnements scientifiques clairement identifiés : le be-

soin pour cette compétence, tout à fait nouvelle, ne fera que croître dans les prochaines années. Des besoins importants apparaissent aussi en imagerie et traitement. Plus classiquement, tout ce qui relève du développement de l'instrumentation (capteurs bon marché, plateforme automatisée, systèmes d'échantillonnage spécifiques, etc.) et de mesures nouvelles (chimie, biologie, etc.) constitue aussi un enjeu majeur.

À noter qu'un gros problème associé aux IR/IE sur des thématiques pointues concerne le salaire. Le CNRS n'est pas compétitif par rapport aux autres employeurs potentiels (particulièrement évident en bioinformatique par exemple) : souvent, les personnes recrutées viennent se 'former' ou avoir une première expérience professionnelle au CNRS avant de partir dans le privé, une fois pleinement opérationnelles.

- Inciter (quels moyens ?) les métiers, émergents et essentiels pour les problématiques de l'INSU, plutôt associés à d'autres Instituts plus disciplinaires du CNRS, à s'impliquer sur le long terme (au-delà d'un projet) dans la recherche de l'INSU. Alternative : créer des postes dédiés au sein de l'INSU ?
- Engager des postes en *Data scientist* dédiés à gérer et analyser les données multiples, hétérogènes et volumineuses (dont l'imagerie) en relation avec des questionnements scientifiques bien définis
- Produire un effort sur les métiers associés au développement de nouvelles instrumentations et mesures.

# Défi 8

## Milieux polaires

**Conseil Scientifique:** Isabelle Vauglin, Alexei Kouraev, Martin Vancoppenolle, Loïc Labrousse, Philippe Koubbi, Jean-Daniel Paris, Camille Lique, Yves Rogister, Roberto Grilli, Emilie Gauthier, Christelle Marlin, Catherine Ritz, Jérôme Chappellaz, Marcel Babin, Anne Choquet, Jérôme Fort, Loïc Segalen et Chantal Claud.





# 1. Quels projets pour quels verrous ?

## CYCLES BIO-GÉOCHIMIQUES

L'étude des cycles biogéochimiques dans les régions polaires est liée au besoin de mieux comprendre et prédire l'évolution du climat et les changements environnementaux globaux. Les régions polaires sont le lieu de processus spécifiques, dont la compréhension nous est limitée par la difficulté d'accès, mais qui participent de boucles de rétroactions globales du système Terre. Le concept de cycle biogéochimique permet d'intégrer un ensemble de recherches distinctes, tant géographiquement que thématiquement. Ces recherches offrent un fort potentiel interdisciplinaire. Il conviendra de distinguer les problématiques sensiblement différentes dans l'Arctique et les régions boréales, et dans l'Antarctique. Dans les régions polaires de l'hémisphère nord les cycles biogéochimiques se jouent fortement aux interfaces entre végétation, sol, atmosphère, rivière et océan. Dans l'Antarctique, les principaux enjeux sont liés à la biogéochimie marine.

Le cycle du carbone est particulièrement important dans les régions polaires. Des communautés souvent distinctes s'intéressent aux composantes terrestres et marines du cycle du carbone. Les échanges de carbone se retrouvent accéléérés par les conditions de changement climatique amplifié dans l'Arctique. Les échanges de carbone entre tourbières, lacs thermokarstiques, et l'export par les rivières représentent des enjeux significatifs. Les flux vers l'atmosphère, notamment de gaz à effet de serre à longue durée de vie (méthane, CO<sub>2</sub>) seront amenés à changer selon des conditions encore mal connues. Le dégel du pergélisol représente une capacité de mobilisation de carbone ancien stocké dans les sols depuis le dernier maximum glaciaire. Des vestiges de ce permafrost en zone côtière désormais inondées ainsi que la formation d'hydrates de méthane sur les talus côtiers représentent un stock de carbone encore mal connu, qui pourrait être déstabilisé à la faveur d'un réchauffement des masses d'eau. La dynamique des vastes forêts boréales, enfin, représente un paramètre crucial dans les flux de carbone entre surface et atmosphère.

L'océan est le siège d'importants processus de transport et d'enfouissement pour les cycles biogéochimiques, et à ce titre les régions polaires ont une importance de portée mondiale. Les processus biogéochimiques marins polaires conservent encore de nombreuses incertitudes liées aux spécificités de l'océan Austral, et la présence de glace de mer et de banquise. Il est crucial de bien comprendre le carbone océanique, et notamment la disponibilité des nutriments, l'impact de la circulation, de la stratification et des upwellings, et les interactions de ces processus avec l'évolution de la banquise et la glace de mer. L'importance relative

des processus de formation de saumures, de perméabilité de la couverture glace ou neige aux gaz, de photosynthèse des écosystèmes restent mal quantifiées. La variabilité et l'évolution de la glace de mer représentent une incertitude supplémentaire dans l'étude de ces cycles. La couverture neigeuse sur la banquise présente un intérêt fortement émergent. L'acidification des océans, et notamment l'océan Arctique, est un enjeu majeur.

Le cycle du mercure dans les régions arctiques et antarctiques a été identifié depuis plusieurs années comme un sujet à fort enjeu, de par son importance pour la santé humaine et des écosystèmes dans des régions polaires vulnérables. De nombreux progrès ont été fait avec notamment la découverte de l'importance des échanges avec les moyennes latitudes et le rôle des rivières dans ce transport latéral. Il reste toutefois de nombreuses inconnues sur l'importance des processus comme la méthylation ou encore sur les impacts, la capacité d'absorption par les organismes vivant dépendant fortement de la forme chimique du mercure.

L'étude de la microbiologie présente de forts potentiels pour lever des verrous présents sur la compréhension des cycles biogéochimiques et notamment le cycle du mercure (Présentation de Catherine Larose). Les microorganismes connaissent une adaptation rapide aux changements environnementaux, dont la présence de mercure. La communauté microbienne joue un rôle important dans la manière dont le flux de matière remonte la chaîne trophique.

La pollution est apparue comme un enjeu fort pour les régions arctiques. Au-delà du caractère crucial des recherches sur le mercure, il reste également à connaître les sources, le transport, le stockage, et les impacts de nombreuses familles de polluants, qu'il s'agisse de polluants organiques persistants, métaux lourds, carbone suie ou ozone. La biomagnification et la bioaccumulation affectent la chaîne trophique de manière encore mal comprise et impactent les populations consommant des produits de pêche et de chasse. Il convient aussi d'améliorer nos connaissances du fonctionnement des feux de forêt et leurs émissions de carbone suie. Il n'est toujours pas clair si de l'ozone est formé ou détruit dans les panaches de feux de forêts. Les émissions de polluants liées aux activités humaines (industries d'extraction de ressources, minerais, pétrole et gaz) affectent les environnements à l'échelle régionale.

Les cycles biogéochimiques dans les régions polaires incluent également une chimie atmosphérique complexe. Un des aspects saillant de la chimie atmosphérique polaire est l'évolution du bilan de l'ozone, avec des phénomènes

différents dans la troposphère (émissions de précurseurs, et ozone depletion events) et dans la stratosphère. Dans la stratosphère notamment le rétablissement des distributions d'ozone dans les vortex polaires, et plus particulièrement antarctique, sont attentivement surveillés. La convalescence de l'ozone stratosphérique polaire est ainsi observée sur les dernières années. Un enjeu est également de mieux comprendre le rôle joué par la stratosphère sur le climat.

Il convient de noter aussi l'importance des approches par archives paléoclimatiques, à travers les enregistrements de *proxies* dans la glace accumulée sur les calottes. Ici l'effort central reste sur la caractérisation fine des *proxies*, afin de mieux comprendre leur fonction de transfert.

## LES SUJETS AUX INTERFACES

### Le cycle de l'eau

Les précipitations sont le terme principal du bilan de masse des calottes glaciaire, mais restent quasiment inconnues même aujourd'hui. Il existe des estimations provenant des réanalyses, des mesures satellitaires provenant par exemple de CloudSat (2005-2011), ou du futur EarthCare (lancement prévu 2022). Les satellites nécessitent des données pour la CalVal, donc les mesures *in situ* sont cruciales. Mais même les mesures *in situ* sont difficiles - défi instrumental et logistique. Il faut élargir les types des instruments utilisés, comme les radars doppler au sol ou autres solution opportunistes. Complexités et spécificités de l'Antarctique - mesures de précipitations, vapeur d'eau et nuages - présentent un défi de la mesure, de compréhension et de la modélisation.

### L'océanographie physique Australe

L'océan Austral est une clé de voûte de la circulation océanique globale et donc du climat. De par les absorptions de CO<sub>2</sub> et de chaleur qui s'y font, et les interactions entre océan-calotte antarctique qui impactent le niveau de la mer, c'est aussi un acteur clé du changement climatique en cours. La combinaison d'observations *in situ*, satellites et de modèles numériques permettent de mieux décrire et comprendre la dynamique océanique dans cette région encore mal connue, et le rôle de cette région pour le climat et son évolution. Cela nécessite des séries d'observations longues qui ne sont possibles dans la communauté française que si l'on améliore la logistique permettant des recherches d'océanographie physique en régions subpolaires. Cela nécessite aussi l'utilisation et l'amélioration des modèles numériques.

### Les interactions océan-glace de mer en Arctique

La fonte de la glace de mer en Arctique, qui n'a cessé de s'accélérer au cours des 10 dernières années, est un des signaux les plus robustes du changement climatique en cours, avec des implications pour le climat et la météo bien au-delà de l'Arctique via des téléconnexions atmosphériques. La disparition de la banquise induit des changements majeurs pour l'océan, qui se retrouve en contact direct avec l'atmosphère, avec des conséquences attendues pour la température de surface, les états de mer, la circulation et les conditions physiques et biogéochimiques, localement et à l'échelle globale via les échanges avec les autres bassins océaniques. Il est de plus en plus nécessaire de prendre en compte une variété de processus sur des échelles de temps et d'espace très variées pour quantifier et comprendre ces changements en cours. Cela comprend par exemple l'étude des interactions entre les petites échelles océanique (vagues, tourbillons, mélange) avec la glace de mer, une meilleure compréhension de la physique de la banquise... Comme pour l'étude de l'Austral, cela nécessite aussi des moyens d'observations dédiés et des efforts importants de modélisation.

Sibérie, hydrologie de surface et coopération Franco-Russe: La Sibérie est un élément clé du système climatique (notamment vu le flux de carbone) et un lieu de grande vulnérabilité (augmentation des températures, fonte de permafrost, métaux et polluants organiques persistants). La Sibérie est un espace peu anthropisé et un laboratoire naturel sous-exploité. Il y a des changements dans les relations homme-environnement, des modes de vie traditionnelles des peuples autochtones, surtout liés à la fin de l'URSS et aux activités autour du pétrole et du gaz. La coopération franco-russe profite de la complémentarité dans les domaines spécifiques, et des relations longues et structurantes (Tomsk, Yakutsk etc.). Le travail de terrain présente les difficultés spécifiques comme la logistique et circulation des équipements et échantillons. Parmi les propositions - faciliter les transits des instruments de mesure, échantillons et données (« passeport recherche arctique »); promouvoir et soutenir des collaborations franco-russes; mettre en place un GT bilatéral pour définir le contour scientifique et opérationnel d'un observatoire de l'Arctique. Ont été mentionnées en outre la coopération existante (GDRI Car-Wet-Sib I et II et autres projets) et le nouveau IRN TTS « Tundra to Steppe : fluxes of carbon, water and metals in Siberia (2020-2023) » qui regroupe 16 partenaires en France et Russie. La combinaison des observations satellitaires et des mesures de terrain permet d'étudier les hydro-écosystèmes en Yakoutie - leur évolution et impact sur l'agriculture et la vie humaine.

## Le pergélisol

L'augmentation de la température de l'air en Arctique va avoir des impacts sur les hydrosystèmes et la cryosphère. La variabilité temporelle et spatiale du pergélisol va impacter le cycle du carbone. 3 défis ont été identifiés :

**1.** Quelles sont les principales rétroactions sur la dégradation des milieux à pergélisol pour différentes échelles ?

**Verrou :** les mécanismes de rétroaction entre érosion, hydrologie, altération chimique, climat et végétation sont mal évalués, il existe une forte variabilité saisonnière et interannuelle, source et transport CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>. Les actions à mener : documenter les feedbacks liés aux émissions de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> des sols Arctiques, et des émissions de CH<sub>4</sub> par les zones humides; modélisation multi-échelle; création et maintien des sites instrumentés (couplage en physique et biogéochimie), et analyse diachronique d'images satellites à haute résolution (thermokarst, feux de forêt).

**2.** Réduction des incertitudes sur les mécanismes contrôlant les couplages climat/pergélisol/carbone.

**Verrou :** Comprendre les couplages climat/pergélisol/carbone qui demeurent complexes à modéliser. Les actions à mener : amélioration des modèles de surface globaux, prévisions (SURFEX et ORCHIDEE); couplage entre approche globale (modélisation), campagnes de mesures aéroportée (YAKAerosib) et terrain; régionalisation : approche intégrée télédétection et transects à l'échelle du bassin versant; Rôle de la neige et de la végétation.

**3.** Quelle est la réponse et la variabilité des systèmes hydrologiques et glaciaires dans un bassin versant ?

**Verrou :** Comprendre la variabilité des hydrosystèmes périglaciaires et des taliks, relations entre eaux souterraines, cours d'eau et pergélisol, la réponse hydrologique d'un bassin versant aux conditions climatiques. Parmi les questions - quantifier l'impact du retrait glaciaire sur l'évolution du permafrost; parts respectives du climat et des conditions du milieu sur les écoulements; contributions des eaux souterraines et du permafrost; origine et qualité des eaux d'écoulement. Actions à mener : mise en place de sites équipés et suivis sur le long terme.

## Glace de lacs et rivières

La glace est très importante pour la structure hydrophysique et hydrochimique de l'eau, les écosystèmes (production primaire, phoques etc.), l'activité humaine (industrie, tourisme, pêche, transport). Les observations satellitaires aident à améliorer d'une manière significative le suivi des processus tels que le timing de gel/dégel, les débits des fleuves, et la dynamique de l'eau sous la glace, comme la relation entre les anneaux géants de glace dans certains lacs (Baikal, Tseltskoye, Hovsgol) et les tourbillons intrathermoclines. Ce type d'études profite de la synergie des données satellitaires et les mesures de terrain et se place dans le contexte de la coopération forte avec l'administration et population locale. La dissémination des résultats au grand public est cruciale pour expliquer ce phénomène et le danger associé pendant le transport sur la glace et minimiser les risques.

## Calottes polaires et incertitudes sur le niveau des mers

La fonte de la calotte antarctique est une contribution majeure à l'élévation du niveau de la mer. Pouvoir quantifier, comprendre, et prévoir les évolutions futures de la calotte antarctique nécessite de relever plusieurs défis : 1) Avoir des modèles de calottes performants en capacité de reproduire les observations avant de faire des projections a priori plus fiables; 2) Le vêlage d'iceberg est un processus mal compris et mal modélisé; 3) Le glissement basal et son évolution reste mal compris et mal contraint dans les modèles, 4) L'océan est le forçage essentiel des changements en cours : la circulation sous les *ice shelves* est peu observée, sa modélisation est balbutiante.

## Paléoclimat en milieux polaires

Les régions polaires présentent de fortes variations sur toute sorte d'échelle de temps. La reconstruction du climat passé, à l'aide de *proxy* et de modèles de climat dédié, permet leur étude. De nombreuses questions scientifiques restent ouvertes (et les moyens nécessaires) :

- Datation calottes Groenland et Antarctique : Dater la roche et la glace basale
- Origine des variations abruptes de niveau des mers
  - Datation
  - Altitude calotte passée – besoin de traceur et fonction de transfert associée
  - Modélisation climat-calotte
- Séquences chronologiques du climat des hautes latitudes Nord-Sud – basses latitudes
  - Traceurs climatiques (besoin manips de terrain pour calibration des *proxies*)
  - Utilisation de modèles (incluant processus polaires et modélisation de *proxies*)
  - Datation
- Lien entre climat, dynamique glace de mer, circulation océanique (e.g. gyres polaires, brines) et cycle du carbone
  - Moyens bateaux hautes latitudes (zones reculées ou couverte par la glace de mer)
  - Traceurs environnementaux pour le passé (glace de mer, productivité...)
  - Modélisation couplée océan-calotte-climat (avec cycles biogéochimiques)
- En Arctique, couplage des sciences « dures » et SHS pour étude du paléoclimat et paléoenvironnement sur les 2000 dernières années.

## 2. De l'importance des observations, de l'instrumentation et des infrastructures

### INSTRUMENTATION

Du fait des conditions particulièrement rudes à la fois pour les hommes et les instruments, les régions polaires requièrent des développements instrumentaux spécifiques. Les besoins scientifiques qui ont émergé et leur déclinaison en terme instrumental sont les suivants :

- **Spatialisation**: Les régions couvertes sont immenses et les mesures souvent ponctuelles. Il y a également un besoin de s'affranchir des contaminations locales potentielles émises par les stations de recherche polaires. Des instruments autonomes sont essentiels pour étendre les domaines observés. Les verrous technologiques sont alors l'automatisation, la communication et l'énergie.
- **Longues séries temporelles**: Divers domaines font ressortir la nécessité de longues séries temporelles pour suivre les variations saisonnières et pluriannuelles des objets (calottes, glacier, glace de mer). De plus dans le cadre des changements en cours (climat, pollution...) les séries longues sont par exemple requises pour identifier ces changements, d'autant que la variabilité naturelle de certains processus est forte. Certains processus demandent également des acquisitions à haute fréquence. Enfin, il y a une demande de transmission de données en temps réel (entre autres pour le pilotage des mesures).
- **Valorisation des mesures « banales »**: Ces mesures semblent quelquefois ne pas être assez innovantes. Elles sont cependant indispensables. De plus, l'adéquation des instruments classiques aux variables pertinentes en milieu polaire peut faire en sorte qu'une mesure évidente ailleurs devienne un défi technologique au pôle.
- **Adaptation des instruments COTS (*Component off the shelf*)** pour tenir compte des conditions spécifiques.
- **Nouveaux développements instrumentaux**: Il y a eu des avancées récentes dans beaucoup de domaines (spectroscopie laser, réseaux sismique denses, optique adaptative, drones, ROV, *gliders*, fibres optique pour transmission et capteur). Il est crucial que la communauté française soit moteur dans ces développements et soit dans les premières à profiter des retombées scientifiques.

Il est à noter que beaucoup des points ci-dessus sont mentionnés dans le retour du défi 16.

### OBSERVATIONS

Un certain nombre de recommandations ont été proposées pour optimiser les observations en terme de retombées scientifiques et d'interdisciplinarité.

- **Synergie entre télédétection, mesures *in situ* et modélisation**: L'observation en milieux polaires peut se faire depuis

des plateformes variées (stations, traverses, aéroportées, campagnes en mer...). À côté de ces mesures *in situ*, la télédétection joue un rôle majeur et a fait ses preuves dans certains domaines, en particulier sur la glace continentale ou la glace de mer (vitesses, altimétrie, étendue). Cette approche va prendre une part croissante et il y a de nombreux projets d'instruments embarqués. Associer toutes les approches permet d'une part la validation *in situ* des mesures satellites (par exemple le challenge d'évaluer l'épaisseur de la glace de mer), mais également la spatia-

- **Importance des approches pluridisciplinaires**: Cette pluridisciplinarité peut viser à améliorer les observations, par exemple en associant Astronomie – atmosphère – glaciologie. Elle est également indispensable pour la prise en compte des systèmes environnementaux dans leur ensemble (océano - glacio - géophysique - biologie – écologie). Il peut s'agir de mutualiser les moyens mais aussi de prévoir des campagnes simultanées (terre – mer par exemple)
- **Le lien avec les utilisateurs est important** pour d'une part effectuer les observations adéquates par rapport aux questions scientifiques posées mais aussi faciliter l'accès aux données.
- **Les services d'observations constituent un élément clé** du monitoring, mais les observations hors services d'observations sont également nécessaires en particulier pour étudier des processus.

### LOGISTIQUE

- **La pérennisation et maintenance des stations est cruciale**. Il s'agit en particulier de DDU et Concordia mais aussi de celles de TAAF (Kerguelen, Crozet, Amsterdam) et celles boréales de Rabot et Corbel au Spitzberg. Dans ces stations et particulièrement à Concordia (entre autre pour l'Astronomie), il y a besoin de connexion internet fiable, de préférence dédiée à la science et avec une bande passante plus large qu'actuellement. C'est la condition du contrôle et maintenance à distance des instruments ainsi que des mesures en temps réel.
- **Les moyens de traverse scientifique en Antarctique se sont beaucoup améliorés** ces dernières années et vont apporter des résultats précieux en ce qui concerne la spatialisation.
- **Moyens aéroportés**.
- **L'importance des moyens à la mer est relevée** par plusieurs disciplines. Il s'agit de brise-glace avec moyens dédiés (hélicoptères, bateaux, équipements scientifiques)

pour accès aux zones côtières éloignées des bases et pour des expériences longue-durée. Parmi l'équipement: Sondeur multifaisceaux (cartographie des fonds et des

colonnes d'eau), carottage, mouillages, échantillonnages océano, Glider / ROV / AUV

## 3. Recommandations

Les communautés polaires travaillant sur une composante particulière du système Terre/discipline restent très disjointes. Il en va de même pour les communautés travaillant sur un hémisphère ou l'autre. On gagnerait sans doute à travailler plus en multidisciplinaires/multi composantes pour adresser des questions aux interfaces d'une discipline donnée. Les liens avec les paléoclimatologues qui regardent des processus similaires sur des échelles de temps plus longues pourraient être renforcés. Peut-être que les liens physiques/biogéochimiques au sein d'une composante du système Terre sont plus immédiat à étudier que les liens entre les composantes elles-mêmes. En termes d'outils et de méthodologie utilisées, il est clair que l'étude des régions polaires nécessitent des outils spécifiques, qui souvent demandent de lourds développements technologiques, quelle que soit la composante considérée. Les instruments utilisés dans la communauté ne sont souvent pas adaptés aux environnements extrêmes que sont les régions polaires, et des systèmes d'observations nécessitent donc des développements dédiés. Les questions d'accessibilité aux infrastructures et de logistiques sont souvent posées. Les modèles utilisés pour étudier les zones polaires doivent plus qu'ailleurs être multi-composantes, avec des composantes spécifiques à ces régions (glace de mer, *ice sheet*, pergélisol...). L'augmentation de la complexité des modèles doit permettre d'aborder de plus en plus de processus et de mieux comprendre les interactions entre composantes du système Terre.

### INFRASTRUCTURES

- *A minima* maintenir celles existantes, mais volonté de le renforcer en particulier sur l'énergie et la transmission de données;
- Répondre aux besoins en mer dans le contexte du sud de l'océan Austral (station, façade, hauturier);
- Favoriser la coordination européenne et internationale ainsi que les échanges de services et d'accès;
- Être vigilant sur les opportunités compte-tenu du contexte politique fluctuant autour de ces dernières.

### INSTRUMENTATION

Des besoins de financement spécifiques à l'instrumentation en milieu polaire ont été relevés:

- Le besoin de prévoir un temps long pour les développe-

ments instrumentaux. En raison du temps nécessaire pour le déploiement chaque difficulté technique sur le terrain signifie souvent une année de décalage.

- La nécessité de financements technologiques découplés des projets scientifiques (en relation avec le temps long) avec un personnel technique qualifié dédié.
- L'idée a été soulevée d'un guichet « polaire » à l'INSU pour les post-campagne (l'IPEV ne soutient que la logistique).

### OBSERVATIONS

Les collaborations internationales pour l'observation polaire sont en général bien développées. Au niveau national, nous souscrivons pleinement aux points développés dans le retour du défi 16 sur le partage des pratiques. Par ailleurs:

- Il faudrait améliorer les bases de données: il faudrait mieux prendre en considération les principes FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*), mais aussi systématiser encore plus le dépôt. L'aspect système d'information géographique avec des cartes de très bonne qualité a aussi été mentionné.
- Il y a un besoin d'archivage d'échantillons (carothèque-lithotèque)

## TGIR ET INTÉRÊT DE SITES INSTRUMENTÉS COMMUNS

Les infrastructures dont la France dispose pour conduire ses recherches en milieux polaires et subpolaires sont les suivantes :

- En Arctique, la station AWIPEV au Svalbard dont la station française Corbel et l'Unité Mixte Internationale TAKUVIK à Québec et son réseau de stations terrestres accessibles via l'organisation canadienne de la recherche.
- Dans le domaine subantarctique, les stations de recherche et cabanes implantées dans les îles et archipels Crozet, Kerguelen et Amsterdam / St Paul, opérées en collaboration entre l'IPEV et les TAAF.
- En Antarctique, la station historique française Dumont d'Urville sur la côte de Terre Adélie, - la station franco-italienne Concordia (TGIR) au cœur du continent, les moyens mobiles de raids terrestres, et le navire ravitailleur L'Astrolabe (rattaché à la TGIR Concordia).

Le vaste contexte collaboratif sur lequel s'appuient les chercheurs français offre parfois accès à d'autres infrastructures, notamment les brise-glaces à capacité océanographique opérés par d'autres nations. Mais cet accès ne fait pas l'objet d'accords au niveau institutionnel permettant de le sanctuariser. D'autre part la communauté française dispose d'outils communautaires pouvant être déployés dans le contexte polaire, comme la flotte aéroportée SAFIRE ou encore les outils de carottages et forages dans la glace (« F2G », ex-C2FN-glace).

Un consensus s'est exprimé sur la nécessité a minima du maintien voire de l'amélioration des infrastructures existantes (notamment par la production d'énergie propre et l'accroissement du potentiel de transferts des données), et l'importance de conserver le soutien du Marion-Dufresne à la logistique des campagnes sub-antarctiques. Le souhait de pouvoir conduire des raids scientifiques légers et rapides en Antarctique a été évoqué également.

Plusieurs intervenants ont souligné le manque de soutien infrastructurel pour des campagnes à la mer au sud de l'océan Austral et notamment dans le secteur de la Terre Adélie, que ce soit en océanographie et biologie marine de station, de façade ou hauturière, alors que pour les deux dernières catégories cette capacité existait en opportunité avec l'ancien navire-ravitailleur Astrolabe.

L'ouverture à l'Europe est plébiscitée mais avec une vigilance particulière à appliquer sur le positionnement du curseur, afin que l'accès à nos propres infrastructures nationales ne deviennent pas plus difficile pour les chercheurs français. Une réflexion devrait être conduite pour déterminer comment intégrer nos infrastructures dans la feuille de route européenne afin de mieux monnayer la contribution française et faciliter l'accès à d'autres infrastructures européennes pour nos chercheurs.

Concernant le contexte arctique, la possibilité d'échange bilatéral de service avec le Canada, impliquant le brise-glace Amundsen, rencontre un fort assentiment.

Plus généralement, la question de l'usage efficient et évolutif des infrastructures de recherche françaises en milieux polaires et sub-polaires gagnerait à voir des perspectives se mettre en place par communautés de moyens. Par exemple la communauté travaillant en astronomie et astrophysique a conduit ce type d'exercice à la fois au niveau national et en lien avec les collaborateurs étrangers pour proposer une stratégie d'investissement à Concordia autour d'instrumentations dans le visible, l'infrarouge et le sub-millimétrique. Il relève ensuite du choix des tutelles d'implémenter pour tout ou partie cette stratégie. Cette approche mériterait d'être élargie à d'autres communautés INSU, en océanographie polaire, physico-chimie de l'atmosphère, études cryosphériques, étude des paléoclimats à partir des archives polaires, géosciences internes, etc.

L'idée d'avoir à DDU un observatoire pérenne et de stature internationale avec de l'instrumentation de pointe fonctionnant en continu (s'intéressant notamment à la question des aérosols, mais aussi des rivières atmosphériques et du rôle des radicaux halogénés) a été abordée.

Les participants ont discuté également des opportunités offertes par des partenariats sortant des cadres institutionnels stricts, par exemple le PolarPod et la compagnie du Ponant. L'avis était globalement réservé car mettant en avant la difficulté de bien cadrer ces partenariats, leur caractère chronophage pour un possible faible retour sur investissement, ainsi que les problèmes éthiques que cela pouvait engendrer.

# Défi 9

La Zone  
Intertropicale  
au regard de sa  
vulnérabilité face  
aux changements  
globaux

**Comité scientifique:** JP. Cammas, T. Lebel, JL. Join, MP. Bonnet, F. Guichard, L. Kergoat, B. Marticorena, G. Pennober, P. Terray, A. Tribollet.



Alain R DEVEZ/CNRS Photothèque

# 1. Thèmes scientifiques

## DYNAMIQUE ATMOSPHÉRIQUE ET LIENS AVEC LA SURFACE

La vulnérabilité particulière des régions intertropicales au réchauffement climatique tient notamment aux modifications importantes que ce réchauffement induit dans la circulation atmosphérique globale (déplacements des cellules de Hadley & Walker, gradients d'énergie entre les pôles et l'Équateur) et régionale (dont notamment celle pilotant les systèmes de mousson). En effet, ces modifications, au-delà des hausses significatives des températures et du niveau marin, induisent des changements dans les cycles saisonniers des pluies, la répartition des climats et des modes de variabilité climatique. Cette vulnérabilité est due aussi à la fragilité des équilibres écosystémiques et socio-systémiques face à l'augmentation de la fréquence ou de l'intensité des événements extrêmes (sécheresses, inondations, cyclones, vagues de chaleur) affectant les tropiques et induite par l'activité humaine. Plusieurs publications récentes

ont souligné, s'il en était encore besoin, que certaines zones de la bande intertropicale pourraient devenir inhabitables que ce soit du fait d'un effondrement systémique (*i.e.* Xu *et al.*, 2020), ou plus simplement en lien avec les limites physiologiques de l'espèce humaine à faire face à de fortes hausses conjuguées de température et d'humidité (Raymond *et al.*, 2020).

Il se trouve que ces régions sont aussi celles où les incertitudes des projections climatiques concernant les précipitations sont fortes pour de multiples raisons. En premier lieu, les modèles de climat reproduisent mal la circulation tropicale et la dynamique des systèmes convectifs en raison de la paramétrisation de la convection atmosphérique et des biais importants de température de surface (océanique et continentale) et plus largement du bilan énergétique affectant ces modèles à la résolution grossière. C'est ainsi que dans les dernières simulations CMIP6, des progrès ont été enregistrés pour certains systèmes de mousson et une

dégradation pour d'autres (e.g., Voltaire *et al.*, 2019). Par ailleurs, l'impact du changement anthropique sur des phénomènes naturels tels que El Nino, les dipôles de l'Océan Indien ou les oscillations intra-saisonnières reste incertain ; or ces phénomènes jouent un rôle essentiel dans l'occurrence et l'intensité des événements climatiques extrêmes, tels que les sécheresses, les inondations ou les cyclones tropicaux. Enfin, les interactions surface-atmosphère y sont très marquées et les effets du réchauffement global pourraient être amplifiés par le biais de rétroactions positives ou du fait des changements d'usage des sols d'origine anthropique.

Les réflexions stratégiques de la communauté devraient en conséquence s'orienter autour de trois grandes directions :

- Une meilleure compréhension et documentation (en particulier pour la communauté des impacts) des lacunes des modèles climatiques globaux sur la zone intertropicale et de leurs conséquences (nature physique des biais, comparaison avec les observations) ;
- La prise en compte des mécanismes opérants à méso-échelle, notamment entre processus convectifs et de surface ;
- Une attention renforcée portée à la question des extrêmes (vagues de chaleur et intensification hydro-climatique). Progresser sur ces trois grands axes dans une optique de mieux alimenter les communautés scientifiques utilisatrices de scénarios climatiques implique de travailler à une meilleure prise en compte des interactions entre les variabilités climatiques interne et forcée pour construire des trajectoires climatiques «réalistes» pour un futur proche.

Il est à noter que les axes de recherche à portée générale de la communauté des modélisateurs du climat (interactions nuages-rayonnement, rôle des aérosols carbonés ou terrigènes, représentation des interactions avec la surface, *nesting* entre modèles globaux et régionaux) peuvent acquérir une dimension spécifique sur la zone intertropicale. Il est également clairement ressorti des échanges qui se sont déroulés lors de l'atelier que pour bien appréhender toutes les conséquences potentielles du CC dans ces régions, il fallait encourager les approches croisées permettant de mieux cerner les processus climatiques, d'un côté, et non climatiques, de l'autre, qui conditionnent la vulnérabilité des populations de la zone intertropicale pour tout ce qui touche à l'eau, l'agriculture et la santé. Ce point relève cependant avant tout du thème «cycle de l'eau et des GES» et n'est donc pas à traiter en tant que tel.

### **Dynamique climatique des régions tropicales en lien avec le réchauffement global**

On voit apparaître dans les modèles l'émergence d'un signal montrant l'influence du changement climatique sur les précipitations tropicales, à des horizons variables selon les régions. Sur plusieurs régions, et notamment en Afrique de l'Ouest et en Amazonie, une tendance à l'intensification hydro-climatique est observée, démarrant à la fin du siècle passée. Il y a des biais ultrarésistants, en particulier sur l'état moyen, présents dans toutes les générations des modèles

climatiques et de prévisions saisonnières sur les régions tropicales: leur réduction est un défi majeur et ils sont l'un des principaux freins à notre connaissance du changement climatique dans ces régions.

Les défis à venir sont donc :

- Réduction des biais de l'état moyen (*cold tongue*, double ITCZ, biais humides sur les océans, biais secs sur les continents) : tout aussi, sinon plus importante, que la quantification exacte de la sensibilité climatique.
- Réduction des incertitudes : meilleure compréhension du rôle des nuages et des aérosols et aussi des interactions entre biais de l'état moyen et tendances climatiques ; importance d'une variabilité interne «réaliste» et de la mise au point d'une stratégie pour tenir compte des modes de variabilité interne observés pour affiner l'estimation des tendances climatiques.
- Comprendre les contributions dynamique et thermodynamique aux précipitations tropicales, quantifier le rôle exact des différentes dynamiques d'ajustement qui conditionnent la sensibilité hydrologique, allant des plus rapides (ajustements radiatif-convectif) aux plus lents (SST) en passant par des dynamiques intermédiaires liées à la hausse des températures atmosphériques.
- Autres: Distribution réaliste des pluies journalières dans les tropiques (paramétrisation de la convection atmosphérique), variabilité interannuelle et ses éventuelles modifications ; cyclones, fonte des calottes polaires et élévation du niveau de la mer, modifications de l'ITCZ (intensité, largeur, position) et expansion des cellules de Hadley...
- Mieux expliquer et documenter les différences entre différentes générations de modèles (CMIP5 versus CMIP6) qui peuvent délivrer des messages sensiblement différents sur l'évolution du climat à l'échelle régionale (par exemple bassin amazonien). C'est une source de perplexité importante pour les communautés travaillant sur les impacts et soulève des interrogations légitimes sur la fiabilité des modèles de climat.

### **Échelles convectives et liens avec la surface**

Les études de ces 20 dernières années sur l'Afrique de l'Ouest (AMMA, post-AMMA, AMMA\_2050) ont montré des changements importants du système climatique régional de la mousson africaine (dynamique régionale, précipitation, chaleur) qui doivent être étudiés plus en profondeur pour mieux en comprendre les mécanismes et les conséquences sur le climat futur de la région. Ces changements restent difficiles à simuler numériquement, mais de nouveaux modèles amènent un réel progrès en s'appuyant sur une représentation explicite de la convection profonde précipitante.

Les défis à venir sont donc :

- Les biais ne concernent pas que les précipitations mais aussi les bilans radiatifs et les températures (notamment nocturnes, essentielles pour la récupération en cas de journées très chaudes) – les biais de température sont particulièrement forts hors de la période de mousson, e.g. au printemps pendant les fortes chaleurs.

- Les difficultés de simulation mentionnées en 2.1 ci-dessus ne concernent pas que les paramétrisations utilisées pour la convection mais aussi d'autres processus physiques concernant les interactions avec la surface continentale (albédo, humidité, prise en compte de la végétation, hétérogénéités...), sur lesquels il faudrait mieux faire travailler ensemble la communauté des atmosphériciens et celle de la surface.

### Focus sur les extrêmes

Une intensification hydro-climatique est détectée sur plusieurs régions tropicales avec un signal marqué sur les extrêmes pluviométriques. Les développements méthodologiques permettant de traiter l'analyse des extrêmes dans un cadre non stationnaire qui peuvent aussi servir d'outils pour détecter des changements de régime. A noter l'apport des séries longues des SNOs pour appuyer ces études diagnostiques.

Les défis à venir sont donc :

- La détectabilité et l'émergence du changement climatique sur une région donnée restent des questions centrales, du fait d'un rapport signal sur bruit faible et du manque de séries longues d'observations « propres » sur les extrêmes
- Les extrêmes dans les modèles : cumul des effets des biais régionaux (voir 1.1) et des résolutions trop faibles pour bien appréhender les signaux sur les extrêmes. Déficit d'études bien construites sur ce sujet.

### CYCLE DE L'EAU ET DES GES – IMPACTS, ADAPTATION ET ATTÉNUATION

La zone intertropicale représente 36 % des terres émergées et une part plus importante encore, et en forte croissance, de la population mondiale. Son fonctionnement est régi par le cycle de l'eau, à l'avenir incertain et peut-être bouleversé. La zone intertropicale joue un rôle majeur dans le cycle des gaz à effet de serre, à la fois en terme de réservoir (biomasse, sols) et de sources ou puits de gaz à effet de serre et de composés réactifs. Elle abrite les régions qui sont déjà les plus chaudes de la planète. Les changements globaux actuels et attendus y sont majeurs, sous l'action des activités humaines et des contraintes climatiques. C'est surtout la zone la moins observée et la moins étudiée de la planète, malgré l'émergence récente des sciences chinoise, brésilienne et indienne. L'observation y est peu structurée et l'expérimentation reste très limitée dans le temps ou l'espace, ce qui entraîne des connaissances très partielles.

L'atelier de prospective a mis en avant de fortes incertitudes sur les interactions entre écosystèmes tropicaux et cycle de l'eau et des éléments : Diminution du puits de carbone des forêts, impacts des sécheresses, émissions de GHG des zones humides, évolution des ressources en sol (érosion et dégradation), ainsi que la méconnaissance de la composante souterraine du cycle de l'eau.

L'atelier a identifié également l'importance des questions

aux interfaces atmosphère/socio- écosystèmes/surface/souterrain, les changements éventuels des circulations de mousson, la difficulté à améliorer les modélisations de type système Terre, à caractériser les forçages anthropiques, et enfin le focus souvent mono-disciplinaire des observatoires. Parmi ces questions ont émergé notamment les émissions de GHG par les zones humides et les forêts, les processus de désertification en zones semi-arides, le cycle de l'eau en zone urbaine et rurale.

L'atelier a identifié plusieurs actions stratégiques qui permettraient d'avancer sur ces questions :

- Développer une approche éco-hydrologique qui permettra de renforcer les interactions entre disciplines autour du concept de la zone critique et favoriser ainsi son adoption par les sciences du vivant et les sciences humaines.
- Contribuer aux efforts de fédération des activités de modélisation des surfaces continentales.
- Développer les liens entre SIC et Terre solide d'une part et l'observation spatiale d'autre part.
- Inventorier les observatoires des différents domaines (INSU, CNRS et IRD) pour mettre en place selon les besoins et les opportunités des sites communs et aborder de façon plus riche des questions transverses (santé, biodiversité, contaminants, transition énergétique, expérimentation).

### DYNAMIQUES ET VULNÉRABILITÉS DES MILIEUX INSULAIRES ET LITTORAUX

La zone intertropicale se caractérise par l'abondance des domaines insulaires océaniques d'origine volcanique. Ces îles perdurent dans le temps à la faveur du développement d'un domaine récifal frangeant qui compense progressivement l'érosion et la subsidence caractéristique des îles hautes pour maintenir un environnement insulaire protégé par un lagon ou un atoll dans les stades ultimes. Ces îles océaniques sont aussi des milieux isolés, contraints dans leur dimensions et vulnérables au regard :

- des risques naturels (aléas volcaniques, hydrologiques ou submersion marine),
- des risques d'érosion de la biodiversité (surexploitation, introduction d'espèces invasives...)
- des risques socio-économiques (gestion des crises économiques, sanitaires ou sociales)

Elles constituent des systèmes dynamiques à échelle réduite dont les forçages et les conditions aux limites sont clairement identifiables et donc propices à des études de référence ou à la simulation du devenir de nos socio-écosystèmes dans un monde changeant.

Dans le cadre de la prospective et des défis INSU, trois enjeux essentiels associés à ces milieux sont présentés :

- Des îles volcaniques : Les volcans océaniques actifs associés aux « îles hautes » sont caractérisés par l'intensité des phénomènes extrêmes en terme de construction volcanique (exemple de Mayotte) ou d'érosion (exemple de la Réunion). Dans les deux cas les risques naturels sont évalués au regard de l'isolement des populations.

- Des îles récifales à très haute vulnérabilité littorale: Ces îles représentent un domaine étalon pour une recherche interdisciplinaire autour de la question du trait de côte dans un contexte de littoral plus que partout et sous contrôle biologique (plages biodétritiques, mangroves, herbiers). Dans ce cadre une recherche pluridisciplinaire est nécessaire autour du socio-écosystème que sont les littoraux tropicaux de par leur forte attractivité anthropique (ressources et aménités). Une science impliquée s'impose en raison des enjeux (richesse et vulnérabilité des milieux et des sociétés littorales tropicales). L'Homme n'est pas à considérer uniquement comme un forçage, il est à présent une part intégrante de certains milieux et des dynamiques à court comme à moyen terme qui les affectent donc il doit aussi faire partie des solutions. Ceci implique un travail à faire sur des notions comme l'acceptabilité des politiques publiques, les politiques publiques et la notion de justice environnementale dans un contexte de changement global. Un investissement important dans les sciences participatives est sans doute une voie supplémentaire et complémentaire à explorer.
- Des milieux et des sociétés dépendants de leurs récifs coralliens: Les enjeux concernent la richesse biologique (25% biodiversité marine), l'importance économique ou physique (barrière naturelle protégeant les côtes) et l'extrême vulnérabilité de cet environnement face aux changements globaux (déjà près de 50% de leur surface ont disparu). Pour mieux comprendre les effets des changements globaux sur ces écosystèmes, il est important d'analyser les possibles rétroactions de certains processus biogéochimiques, de pouvoir identifier des zones refuges ou autres solutions d'adaptation/mitigation qui participent à l'évolution de ces milieux. Pour répondre en partie à cet objectif, des études pluri, inter et transdisciplinaires sont indispensables. Elles sont de plus en plus menées à différentes échelles spatio-temporelles (régionales, bassins océaniques, année, décennie, siècle...), et comprennent la recherche de *nature based solutions* et de la modélisation pour tenter de mieux prédire l'évolution de ces écosystèmes d'ici 2100.

## 2. Recommandations

### DYNAMIQUE ATMOSPHÉRIQUE ET LIENS AVEC LA SURFACE

#### Dynamique climatique des régions tropicales en lien avec le réchauffement global

- Définir des régions d'étude privilégiées ?
- Rôle de la modélisation régionale et de la modélisation haute résolution (maille inférieure à 5 km de côté) pour des simulations régionales ciblées et pour des études sur la sensibilité de la convection précipitante à différents aspects du changement climatique ?
- Approfondir la question du rôle des aérosols selon leur nature et de la surface (exemple de l'Amazonie où les rôles respectifs de la déforestation et du réchauffement de l'Atlantique tropicale sont discutés) ;
- Mieux comprendre les rôles respectifs de la variabilité climatique interne et forcée dans les évolutions passée et future du climat tropical ;
- Documentation des simulations existantes et des outils disponibles) pour faciliter l'utilisation de l'info climatique par les différentes communautés afin d'éviter que les simulations restent sous-utilisées, voire inutilisées.

#### Échelles convectives et liens avec la surface

- Travailler sur les tendances climatiques de l'eau précipitable
- Tendances sur les gradients de température, qui conditionnent les dynamiques précipitantes
- Évolution des cisaillements de vent et de leur influence que la dynamique des systèmes convectifs de méso- échelle.
- Avancer sur les interactions surface-convection à méso-échelle (il reste encore beaucoup à comprendre si on veut être capable de les modéliser dans des modèles à maille grossière)

#### Focus sur les extrêmes

- Approfondir la question des gaps d'échelles entre modèles et besoins pour les études d'impact, particulièrement handicapants au plan statistique quand on travaille sur les extrêmes
- Mieux cerner l'influence des circulations tropicales et tropicales-latitudes tempérées pour l'étude des phénomènes extrêmes (précipitations intenses, sécheresses, vagues de chaleur) et les mécanismes d'interactions avec les processus physiques

- Encourager des études diagnostiques croisées entre observations et sorties de modèles s'appuyant sur les avancées méthodologiques récentes et sur les mécanismes identifiés.

## CYCLE DE L'EAU ET DES GES – IMPACTS, ADAPTATION ET ATTÉNUATION

L'atelier a identifié plusieurs actions stratégiques qui permettraient d'avancer sur ces questions :

- Développer une approche éco-hydrologique qui permettra de renforcer les interactions entre disciplines autour du concept de la zone critique et favoriser ainsi son adoption par les sciences du vivant et les sciences humaines.
- Contribuer aux efforts de fédération des activités de modélisation des surfaces continentales.
- Développer les liens entre SIC et Terre solide d'une part et l'observation spatiale d'autre part.
- Inventorier les observatoires des différents domaines (INSU, CNRS et IRD) pour mettre en place selon les besoins et les opportunités des sites communs et aborder de façon plus riche des questions transverses (santé, biodiversité, contaminants, transition énergétique, expérimentation).

## DYNAMIQUES ET VULNÉRABILITÉS DES MILIEUX INSULAIRES ET LITTORAUX

Le milieu insulaire tropical apparaît plus que jamais comme un chantier géographique remarquable associé aux verrous thématiques de ce défi. Il se focalise sur des objets particulièrement facile d'accès à l'échelle d'une île : atmosphère/ eau/ volcan/ littoraux/ récifs et sur des dynamiques prégnantes pour les socio écosystèmes insulaires: Changement global, risques, résilience, conservation.

Les principaux points discutés en table ronde :

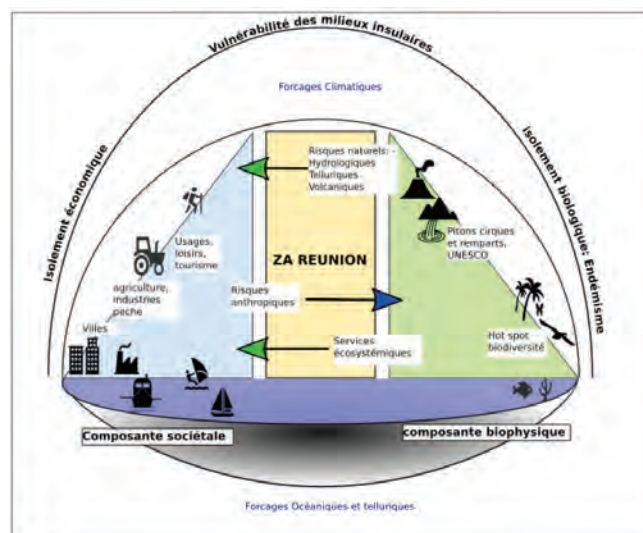
- Les zones insulaires tropicales représentent des observatoires privilégiés pour répondre sur le long terme aux principaux objectifs du développement durable appli-

cables à la zone tropicale. (Points particuliers répartis à l'échelle mondiale)

- L'isolement de ces milieux et la pluri nationalité de ces territoires pose le problème de la mise à disposition des données. Les participants ont insisté sur l'importance des infrastructures de recherche en lien avec Data Terra et sur l'attention particulière à accorder aux revendications nationales dans les souverainetés insulaires qui implique un travail sur l'éthique du partage de données.

Dans ce cadre les milieux insulaires constituent une échelle intéressante (méso-échelle) pour étudier les problématiques environnementales de manière intégrée. Les îles deviennent un cadre conceptuel pour développer ce type d'approche. Avec des atouts liés aux caractéristiques de ces milieux (petite taille, isolés etc.), les îles tropicales sont finalement des laboratoires pour l'étude des trajectoires des socio-écosystèmes. Ces milieux sont caractérisés par des chaînes de transfert très courte, des systèmes isolés, soumis à des rétroactions politiques et sociétales rapides. Les petites îles tropicales peuvent en effet constituer le lieu idéal pour développer une recherche intégrée s'appuyant sur interactions société/vulnérabilité sur des questions telles que: vulnérabilité extrême cyclones, volcan, impacts sur les écosystèmes marins, quels contrôles, pour maîtriser le développement. Cette approche pourrait appuyer le chantier insulaire UICN (stratégie et management) qui se propose d'utiliser les territoires français comme vitrine).

Développer le concept d'île, «laboratoire des approches intégrées», nécessite un développement accru de la coopération entre les communautés scientifiques nationale et transnationale. Une conclusion issue des tables rondes consiste à proposer un défi possible pour l'INSU sur le modèle des programmes type *Transnational Access* adapté aux DOM-TOM ! Il s'agirait de tendre par ce type de programme à se rapprocher du rapport moyen national du nombre de chercheur par habitant (La Réunion par exemple représente 3 % de la population Française et abrite 0,05 % des effectifs chercheur du CNRS).



# Défi 10

## Continuum et Interfaces Terre-Mer

**Conseil scientifique: Frédéric Garabetian, Vona Meleder, Nicolas Rocle Et David Amouroux, Xavier Bertin, Bruno Castelle, Yoann Copard, Julien Deloffre, Pierre Labadie, Christophe Rabouille, Aldo Sottolichio, David Vignatti.**



Erwan AMICE / LEMAR / CNRS Photothèque

Le continuum et les interfaces terre mer (CITM) sont un constituant majeur de la zone critique définie comme un « milieu poreux et perméable, créé par la transformation de la croûte terrestre par l'eau et les êtres vivants et milieu de vie de l'humanité ». Le CITM est un des lieux (i) où se matérialisent les interactions de la zone critique avec d'autres enveloppes du système Terre que sont l'océan et l'atmosphère mais aussi la biosphère et l'hydrosphère et (ii) où se concentrent une part des activités humaines. Ce continuum est donc un système d'interfaces dynamiques constamment remodelé par l'évolution de l'action des forçages climatiques et anthropiques mais aussi géologiques. Son extension spatiale recouvre la tête du bassin versant jusqu'à la marge continentale, voire jusqu'au domaine abyssal, et intègre l'ensemble du réseau hydrographique, incluant les eaux souterraines. Cette position clé d'interface engendre ainsi des variabilités importantes des paramètres physico-chimiques, biologiques et sédimentaires influençant le fonctionnement de ces systèmes.

Mais le CITM ne se limite pas à un périmètre géographique. Selon une logique *source-to-sink* et en considérant une particule ou un contaminant, les réceptacles (*sinks*) de ce continuum peuvent également être des organismes vivants. Le continuum s'apparente ainsi à une spirale de diffusion-advection-transformation de gaz, solutés ou particules transférés de compartiments sources où ils sont produits vers d'autres compartiments où ils sont métabolisés ou accumulés et séquestrés. Cette acception du CITM inclut les rétroactions et liens aval – amont ainsi que les connectivités latérales et verticales à l'échelle du bassin versant, ce qui justifie de ne pas limiter le concept directionnel du CITM à l'axe longitudinal amont-aval (« fil de l'eau »).

Le CITM peut également être pensé et défini comme un espace politique où se combinent différents modes d'organisation et de régulation des sociétés qui y vivent et qui en vivent. À l'échelle mondiale un grand nombre de mégapoles sont situées sur des interfaces terre-mer, suite à une histoire singulière d'aménagement des territoires (infrastructures portuaires, poldérisation, barrages, assèchement de zones humides...), d'attractivité démographique et touristique, de gestion et de prévention des risques associés (infrastructures de protection, etc.).

Conceptuellement, le CITM est ainsi, comme l'illustre la prospective SIC de 2019, un composé d'interfaces multiples et donc de gradients et de transitions. Ce sont des milieux ou zones d'interface (mangroves, estuaires, deltas, villes fluviales ou littorales, ports...), des interfaces physiques entre eau et sédiment, air et sédiment, eau salée – eau douce ou bien des interfaces virtuelles (interface homme – nature, humains – non humains, savoirs-pouvoirs...).

Compte-tenu des définitions complexes et non exhaustives du CITM, entremêlant physique, biologie, écologie, chimie, sédimentologie, géomorphologie, hydrologie, hydrogéologie, sciences politiques, économie, et géographie, le panel réuni à l'occasion de cette prospective s'est voulu le plus exhaustif possible en terme d'expertise. Cependant la participation à l'atelier d'une majorité de spécialistes du domaine côtier d'une part, la moindre représentation de spécialistes des interfaces bassin versant et/ou de la biodiversité d'autre part, ont inévitablement conduit le panel réuni à focaliser son action sur la partie aval du CITM, sur les interfaces terre-mer ainsi que sur la portion des marges sous l'influence d'eaux douces (River-dominated Ocean Margins [RIOMar]).

# 1. Enjeux scientifiques et/ou technologiques

La plupart des modèles de prévision d'évolution des CITM en réponse au changement global s'accordent sur un scénario de réduction des flux hydro-sédimentaires, de comblement des baies et des estuaires, sur une augmentation du niveau marin relatif et des processus d'érosion du littoral soumis à un renforcement de l'hydrodynamique, dans un contexte de pénurie sédimentaire. La morphologie des CITM va donc se modifier. Ce(s) changement(s) (ou perte(s)) d'habitats pour le vivant et les sociétés humaines sont au cœur des enjeux d'adaptation et notamment, pour ce dernier, de choix stratégiques par exemple entre ouvrages de défense et dépollérisation.

L'énergie reçue au niveau des CITM deviendrait hypervariable (ou difficilement prédictible) accentuant l'hétérogénéité, troublant la temporalité des systèmes, et augmentant le risque d'accidents industriels (Fukushima, Lubrizol...). Ces changements profonds peuvent aussi s'appréhender rétrospectivement par le décryptage des archives sédimentaires (fluviatiles, estuariennes ou marines), qui renseignent sur la réponse et l'adaptation de ces territoires (bassins versants), et leurs trajectoires associées selon différente temporalité (décennale, séculaire, voire millénaire).

Dans l'eau, il faudrait s'attendre à une modification des processus biogéochimiques et cycles associés (e.g. blue C, eutrophisation, contamination). Dans ce cadre, les pressions chimiques changeraient de nature et évolueraient vers plus de complexité et vers une origine de plus en plus diffuse : fragmentation des déchets solides en micro- voire nanoparticules, cocktail de molécules multiples, plus dégradables et plus dégradées, dont les effets délétères des produits de transformation sur les écosystèmes sont encore largement méconnus, bouleversement des processus biogéochimiques dans un contexte de changement des régimes de température, acidité, salinité et oxygène à même de modifier le fonctionnement des CITM classés parmi les écosystèmes marins les plus productifs et les plus diversifiés. Ainsi, les multiples stressés du système d'interface côtière (acidification, hypoxie, réchauffement) entraînent-ils des altérations sans précédent du fonctionnement des écosystèmes allant jusqu'à la perte de fonction (régulation des nutriments, enfouissement du carbone).

La marinisation en cours des interfaces et des fonctions de nourriceries qu'elles portent s'accroîtraient ; leur contamination modèlerait les communautés (shifts), les espèces étant représentées par des individus de plus petite taille, malades ou stressés. Ces pressions changeraient de nature, engendrant de nouvelles boucles de rétroactions, modifiant les processus biogéochimiques, et évolueraient vers plus de complexité. On peut citer à titre d'exemple la fragmentation

des déchets solides en micro- voire nanoparticules, les cocktails de polluants émergents présent le long du CITM et montrant des réactivités variables dont les effets délétères des éventuels produits de transformation sur les écosystèmes sont encore largement méconnus. Cependant, les pressions chimiques liées à l'eutrophisation telles que les nitrates, ou les phosphates restent aussi à surveiller et étudier.

On mesure à partir de différents exemples que des cascades d'évènements peuvent se produire, aboutissant à rendre la mer et le littoral plus hostiles (tempêtes, submersion, contaminations chimiques et microbiologiques (norovirus, dépassement d'ouvrages), méduses, HABs, marées vertes). Le littoral pourrait donc évoluer d'une zone récréative (aménités, attractivité touristique) vers une zone de production, à risques, réservée à ceux qui travaillent en mer ou sur le littoral. Ce scénario pessimiste et basé sur de très nombreuses incertitudes s'inscrit pour l'ensemble des CITMs tempérés occidentaux. Or ce constat ne doit pas se limiter aux climats tempérés occidentaux et il convient d'intégrer, poursuivre et renforcer les études conduites Outre-mer (Guyanne, Antilles) et dans les projets internationaux (e.g. IRD Vietnam, Chine...).

## INCERTITUDES, SIGNAUX FAIBLES, ET APPROCHE INTÉGRÉE DU CITM

Les incertitudes résultent d'abord de la difficulté d'anticiper les mesures de gestion, de régulation, d'innovations locales et d'adaptation (décisions politiques) dont l'urgence est souvent incompatible avec l'élaboration, la mise en œuvre et la valorisation des recherches. Une deuxième source d'incertitudes réside dans la difficulté à identifier et modéliser les effets indirects et rétroactions liés aux activités anthropiques et au changement climatique, en comparaison de leurs impacts directs. D'autre part, l'impact et le rôle déterminant sur les trajectoires, des évènements extrêmes du point de vue de leur temporalité ou de leur intensité (cf. défi « extrêmes »), sont encore difficiles à appréhender. Ainsi les difficultés d'identification et de traitement analytique des aspérités ou évènements rares et des changements d'état dans les jeux de données sont un frein à la reconstruction (et la prédiction) des trajectoires. Les évènements rares ne sont pas nécessairement des évènements extrêmes, de plus certains évènements générant des transitions sont eux récurrents mais ils ne présentent pas nécessairement avec une fréquence régulière. Ces différents évènements sont non prédictibles par les modèles et non captés par les mesures. Cette notion d'incertitude concerne également le travail expérimental, dans le cadre duquel les évènements transitoires (non catastrophiques) sont lissés (au mieux) ou négligés par les modèles.

Afin de lever ces incertitudes et confirmer le fil conducteur de l'évolution des CITM ou en gommer les invraisemblances, il convient de relever le défi d'une compréhension systémique de l'ensemble du continuum intégrant ses composantes sociales, économiques, physiques et écologiques. Cela suppose une approche intégrée, permettant de relier les grands compartiments du CITM incluant les interactions entre le monde vivant et le milieu physique et en particulier la prise en compte explicite des actions humaines dans ces interactions ainsi que des phénomènes de rétroactions (vivant sur physico-chimie du milieu). De plus il faut souligner la nécessité de relier les zones aval aux zones amont, bassin fluviaux et bassins versants amont.

Cette approche intégrée préconisée dans la prospective SIC de 2019 (e.g. de l'observation à la modélisation mais aussi benthos - pélagos - biogéochimie) est une démarche qui s'impose pour prendre en compte les spécificités des CITM et leur forte hétérogénéité (spatiale). La France métropolitaine qui compte 5 façades maritimes et plus de 3 500 km de côtes peut alimenter une banque de zones clés à étudier pour voir comment vont évoluer différents CITM en fonction de spécificités choisies dans des buts comparatifs et analytiques. Il est nécessaire d'étendre ces comparaisons aux zones tropicales et arctiques ultramarines. L'objectif serait ici de tenir compte de différenciations régionales fortes dans la variance, les forçages comme le climat et la dimension anthropique, facteurs de contrôle, dont on connaît encore mal l'évolution. On ignore toujours comment traiter la question du CITM pour tendre vers une connaissance plus générique de ces systèmes. Faut-il aller vers une (des) typologie(s) des continuums qui permettrait de comparer les systèmes entre eux (tant au niveau national qu'international), ou alors les étudier séparément en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques en lien avec des problématiques qui leur sont propres (type niveau de la mer, eutrophisation, acidification, désoxygénation, événements cévenols, utilisation des sols, du territoire, géotopographie) ?

Les dynamiques temporelles et spatiales ne sont pas les mêmes pour les écosystèmes terrestres, et les écosystèmes marins qui sont eux, régulés par l'hydrodynamique. Connaître et modéliser la dynamique des CITM nécessite de s'intéresser aux tendances et aux variabilités (à différentes échelles de temps) des processus en incluant les événements extrêmes et les événements transitoires pour, par exemple, identifier les effets cascade. Dans la plupart des cas l'histoire du continuum peut éclairer sa dynamique actuelle et future justifiant de disposer d'archives pour des analyses rétrospectives comme le soulignait déjà la prospective SIC de 2019. Un point d'amélioration porte sur la veille, la détection et l'analyse des signaux faibles.

## RÉSILIENCE DES STOCKS ET RESSOURCES, ADAPTATION

Alors que des événements extrêmes ou intenses et transitoires (crues, tempêtes, submersions, désoxygénation, contamination...) ainsi que des phénomènes moins fugaces (marinisation des estuaires, acidification, augmentation de l'érosion, contamination chronique...) affectent les CITM, la question du « point de non-retour » reste sans réponse consensuelle. Et la notion de résilience, débattue. Si le retour à la situation antérieure (résilience) peut être plus facilement appréhendé après une perturbation délimitée dans le temps et l'espace, il devient plus complexe à mesurer sur des temps longs (décryptage d'archives sédimentaires) ou à l'échelle d'un CITM. Dans un contexte de changements en cours, les tendances et trajectoires ne décrivent-elles pas mieux le comportement d'écosystèmes dont la résilience serait, d'évoluer vers un nouvel état d'équilibre plutôt qu'un retour à un état antérieur ? Ainsi à titre d'exemple, une plage résiliente s'engraisse à nouveau après une tempête indépendamment du recul du trait de côte. La même constatation peut être faite face aux changements de biodiversité qui permettent cependant de conserver les mêmes fonctions écosystémiques.

Un des défis d'adaptation est lié à la temporalité des événements impactant les CITM. Ces différences de temporalité (i.e. changements globaux vs perturbations transitoires de types événements extrêmes contaminations ponctuelles) induisent des effets combinés dont la lecture et les stratégies d'adaptation sont par nature complexes.

## GESTION, GOUVERNANCE DE CES CONTINUUMS, POLITIQUES PUBLIQUES, ET MÉDIATION SCIENTIFIQUE

Les politiques publiques doivent soutenir l'adaptation des écosystèmes face aux changements. Elles doivent impérativement se baser sur les connaissances scientifiques, et non pas sur des notions strictement économiques mettant à mal certains principes écologiques (ex. : culture de maïs dans la région Aquitaine, nécessitant une grande prise d'eau, et induisant le lessivage des terres, responsable de contaminations diffuses sur le continuum). Ainsi, en domaine littoral, et à titre d'exemple, ces politiques doivent encourager la conservation/restauration des zones humides et/ou végétalisées, zones tampons pour absorber les submersions. Elles doivent également intégrer le principe de submersions « contrôlées » en acceptant d'évaluer les solutions de repli face à l'élévation du niveau marin (ex. retrait de digues, dunes littorales et côtes sableuse océaniques) et ce malgré les implications en terme de perte de terres agricoles et habitées.

La médiation des recherches conduites par les scientifiques à destination des décideurs et des citoyens constitue un enjeu majeur et un préalable important à toute modification des politiques publiques. Cette médiation doit dépasser la vision idyllique du littoral et du CITM du point des infrastructures et des services de loisir, en s'appuyant sur l'importance de certains éléments constitutifs de ce domaine d'interface, telles les vasières littorales, peu attrayants d'un point de vue paysager, mais indispensables au bon fonctionnement du continuum, ainsi que des infrastructures en adéquation avec les risques et contraintes du milieu. Cette activité de médiation relève déjà des missions de structures existantes tels les OSU et les GIP. Il sera nécessaire d'amplifier cette initiative via le développement de nouveaux outils (métiers, supports, réseaux, sciences participatives...).

### RELATIONS SANTÉ-ENVIRONNEMENT ET BON ÉTAT ENVIRONNEMENTAL DU CITM

L'intrication santé-environnement peut être illustrée par le cas des marées vertes qui résultent des pratiques agricoles déversant un excès de nutriments sur le continuum. Les proliférations massives ainsi générées impactent directement la santé humaine (dégagements de H<sub>2</sub>S) mais aussi la qualité de plages sur les plans écologiques (eutrophisation) et organoleptiques (esthétique paysagère, odeurs). On peut également évoquer les diverses molécules déversées dans l'environnement puis que l'on finit par retrouver dans l'assiette du consommateur ainsi que les pathogènes bactériens ou viraux.

La qualité de vie et le bien être humain justifierait de préserver des espaces naturels dont les aménités ne doivent pas masquer les dangers dus à une méconnaissance de leur fonctionnement. Ainsi, selon l'OMS, la noyade deviendrait la 3ème cause de mortalité accidentelle justifiant de comprendre, modéliser l'hydrodynamique et la courantologie des plages par exemple.

Santé de l'environnement et santé humaine s'influencent mutuellement. Les nouveaux médicaments et nouveaux métabolites, les molécules produites lors d'accidents industriels ont, dans l'environnement, une action qui peut se cumuler avec des contaminants plus anciens comme les antibiotiques, voire des contaminants qu'ils soient organiques ou inorganiques, hérités et stockés ou archivés dans les sols superficiels et sédiments. Les modes actuels de production - consommation favorisent l'émission de ces substances et micropolluants dans les milieux. Leurs temps de rémanence pourraient être importants (> 30 ans), augmentant les risques d'évolution et de complexification de l'exposome (intrants chimiques et physico-chimiques). Ces questions figurent parmi les enjeux et les problématiques émergentes du CITM.

La concentration de populations dans de grands ensembles métropolitains en zones côtières et estuariennes rend ces effets d'autant plus importants et impactants que les dynamiques de circulation et d'épuration (services de régulation) sont faibles. La croissance de la taille des ports et les activités à risque qu'ils concentrent, ainsi que les nouvelles matières qui y transitent (e.g. gaz liquide), peuvent générer de nouveaux aléas. Ainsi observe-t-on une typologie différente par site du schéma des pressions anthropiques. Il est donc rappelé (comme cela est évoqué dans les perspectives SIC 2019) que des verrous de connaissance subsistent sur les effets des contaminants sur le long-terme lors d'expositions chroniques, les effets associés aux multi-stress (Effet cocktail, changement climatique, antibiorésistance, etc.). Les effets cumulés de stress multiples (cocktail multistresseur, multistress) doivent ainsi être appréhendés sur un socio-écosystème au moyen d'indicateurs combinés bio-géo- physico-chimiques et socioéconomiques afin de questionner les pratiques de production / utilisation et les modes de consommation pour caractériser ces interactions Santé - Environnement.

Le bon état écologique est « normé » selon des directives. La DCSMM introduit la question des tendances d'évolution temporelle et promeut un meilleur équilibre entre surveillance et acquisition de connaissances. Cependant les indicateurs DCE et DCSMM n'étant pas toujours adaptés à la description de l'état d'un système, il y a tout lieu de croiser ces données et indicateurs avec des savoirs empiriques. L'équilibre entre un milieu en bon état de fonctionnement et une société humaine en capacité d'exister et de fonctionner (selon des standards de qualité de vie et de satisfaction de la vie) constitue un défi pour pérenniser des systèmes socio-écologiques dans une perspective dynamique et résiliente en tenant compte des nouvelles contraintes liées au changement global. Les couplages environnement - santé nécessitent une transformation vers la soutenabilité des territoires (écologique et économique-sociétale). Il faut en effet penser et gérer les socio-écosystèmes à l'échelle territoriale (en pensant les emboîtements d'échelles, cf. fleuves transfrontaliers) et veiller à la place des savoirs scientifiques dans les prises de décisions, selon des approches et principes inspirés de l'adaptive co-management pour s'adapter à des changements rapides et/ou incrémentaux de long terme.

Dans la crise environnementale actuelle caractérisée par des perturbations majeures des zones littorales liées à l'acidification, l'hypoxie, le réchauffement estival, l'eutrophisation rémanente liée aux nutriments hérités, les dynamiques de ces perturbations, leurs effets individuels et leurs effets conjugués sont extrêmement mal connus. Elles font toutes intervenir des processus multi-disciplinaires (physique, sédimentologie, biologie, géochimie, microbiologie) et requièrent donc des efforts intégrés de grande ampleur pour

comprendre les processus qui les déterminent ainsi que leur sensibilité aux modifications en cours (climatiques, intrants, contamination)

## OUTILS

L'observation à long terme est indispensable pour identifier les tendances et seuils. En France, se sont constitués de nombreux réseaux à haute fréquence et long terme, souvent coordonnés à l'échelle nationale mais rarement à l'échelle des continuums. Pour des systèmes complexes et dynamiques et donc hétérogènes composants le CITM, l'observation long terme n'est pas suffisante et nécessite d'être complétée par de l'expérimentation et de la modélisation. Il est donc indispensable d'étudier les processus et leur cascade dans le milieu naturel, pour comprendre pas les déterminants de divers types de dysfonctionnements affectant le milieu récepteur (HAB, gélatineux). L'intégration à l'échelle du continuum des différentes échelles spatio-temporelles nécessite un découplage et un chaînage et une imbrication des modèles sur le continuum. Le couplage de modèles économiques et écologiques (modélisation socio-éco-systémique) tendant vers un modèle de continuum 5D doit également être encouragé comme l'indique la prospective SIC 2019 dans son item « Continuum de modèles vs modèles de continuum ». La télédétection, enfin, constitue un excellent levier pour le changement d'échelle tant au niveau de l'observation qu'au niveau de la modélisation.

Parmi les développements méthodologiques, les approches omiques offrent la promesse de nouveaux indicateurs notamment dans des approches sans *a priori* qui permettent de caractériser la nature de l'exposome, du métabolome, du xénométabolome. Face à l'apparition régulière de nouveaux contaminants et en relation avec le développement de nouveaux capteurs, ces approches peuvent contribuer à caractériser les effets globaux ou à identifier des modifications induites chez des espèces sentinelles en relation avec un gradient d'impacts.

La temporalité de la recherche et celle des changements diffèrent de plus en plus. Les scénarios de trajectoires à partir de rétro-analyses permettent d'estimer la qualité du modèle à reproduire des événements et/ou trajectoires passés. Le décryptage à haute voire très haute résolution des enregistrements sédimentaires (comme la caméra hyperspectrale) et archives historiques autorisent la mise en œuvre d'études rétrospectives de mises en situation (paléosubmersion, paléotsunami...). Ainsi les archives des paludiers permettent de reconstruire jusqu'au Moyen-Âge la chronologie des phénomènes de submersion. Les *environmental specimen banks* (banques d'échantillons préservés permettant des rétro-analyses au niveau moléculaire) ou les enregistrements naturels au sein d'organismes-sentinelles (végétaux,

biominéraux tels les coquilles de bivalves ou les otolithes de poissons, biomatériaux organiques...) constituent des outils complémentaires.

Les temps de transfert des particules ou de la fraction dissoute entre compartiment du CITM, les processus biogéochimiques, la modification de leurs rétroactions et des cycles des éléments associés (e.g. carbone) ainsi que l'origine des fractions étudiées et leur devenir, peuvent être identifiés par la compréhension de nouvelles signatures géochimiques et en particulier isotopiques (stables: e.g. Fe, Si ou radioactif: e.g. C, H). A titre d'exemple et pour le carbone, les nouveaux outils, (ligne DO C) et leur raffinement (ligne ECHOMichadas) trouvent toute leur place dans ces questionnements fondamentaux.

Les sciences participatives constituent une nouvelle voie de développement des outils de médiation. Elles permettent des apprentissages collectifs et sont des moteurs de transfert vers la société. De plus, elles peuvent satisfaire de nouvelles exigences managériales (multiplication des sites d'observation, augmentation de la fréquence de suivi et d'observation, diminution des coûts d'observation) et démocratiques (science ouverte, *open data*, co-construction de savoirs entre scientifiques et citoyens).

La bancarisation des données est une exigence concrètement prise en compte pour ce qui concerne les données de recherche. En revanche, les « données grises » générées lors de suivis réglementaires divers d'installations et/ou de milieux ainsi que les données dites vernaculaires sont encore trop souvent oubliées dans cette démarche. Pour beaucoup de données le décalage entre les exigences des suivis réglementaires et ceux liés à la recherche qui utilise des outils novateurs pas encore normalisés peut faire obstacle au recouvrement des données. Il convient donc de réfléchir à l'harmonisation de ces jeux de données. Les infrastructures de recherche (IR) représentent le cadre adapté pour définir le périmètre des enquêtes visant à identifier les données utiles en vue de leur bancarisation. Les OSUs constituent le meilleur interlocuteur à l'échelle locale pour les collecter. Il pourrait y avoir une forme d'urgence à cela avant que des structures à visées lucratives (commerciales) ne s'emparent de ce type de données. Au-delà des données elles-mêmes, l'*Open Science* pourrait être un moyen de facilitation des connexions entre les ZNO.

## FORCES ET FAIBLESSES DE LA COMMUNAUTÉ DE RECHERCHE

Le défi principal relatif au ZA opérationnelles réside dans l'observation des changements, l'enjeu étant donc d'aller vers des observatoires des transitions en interfaçant, notamment pour le continuum terre - mer, les observatoires des sciences biologiques, chimiques et physiques (para-

mètres environnementaux, pêches, hydro-géomorphologiques...) avec celles déclinées par les OHM s'intéressant aux changements de pratiques. Une faiblesse importante des initiatives d'observation du CTIM résulte dans l'implantation non concertée des stations instrumentées mais aussi dans la dispersion d'infrastructures de recherche qui partagent questions, protocoles, et synergies de recherche. Le manque d'interactions entre les initiatives de mesures amont - aval au sein d'un même continuum, mais aussi entre continuum, entre les systèmes géographiques constitue un deuxième frein important à l'étude et la compréhension synoptique du CITM.

La recherche se doit de convaincre ses partenaires de l'unité amont-aval du CITM, dans une ambition d'adaptive co-management de ce continuum. Les OSU, interfaces INSU - Université - Région, sont des lieux et structures privilégiées de formalisation des interactions entre chercheurs, gestionnaires, et société civile, et de croisement entre les réseaux nationaux et les réseaux régionaux. Les ZA remplissent néanmoins ce rôle et leur regroupement sous LTER France avec OZCAR peut être un bon moyen pour l'INSU de s'inscrire dans la dynamique en lien avec l'INEE. Certains réseaux régionaux (e.g. MAGEST) non labellisés INSU du fait de leur cadre partenarial, souffrent ainsi d'un manque de visibilité nationale hors du périmètre géographique de leur OSU. Il y a une forme d'urgence à collecter et partager les données issues de systèmes d'observations inféodés à une structure locale en utilisant les systèmes mis à disposition par les infrastructures et établissements nationaux (e.g. système de données marines côtières sur SEANOE). Une telle démarche peut être développée en lien avec IR Data Terra et ses différents pôles au niveau national et étendue aux initiatives européennes (réseau européen eLTER pour IR OZCAR).

Sur la veille, la difficulté est d'ordre opérationnel pour mobiliser des moyens quand il y a une crise ou un évènement imprévu. Se structurer à l'échelle des façades pour saisir les épisodes par nature transitoires, fugaces voire soudains et parfois violents nécessite de s'y être préparé à l'image de la cellule post sismique. Il conviendrait d'identifier quelques sites sur lesquels déclencher une *task force* avec des SHS pour mener à bien les premières constatations et appréhender les évènements imprévus.

Sur les moyens humains dédiés à l'observation le seul corps des 400 astronomes est insuffisant. Par ailleurs une réflexion est à mener pour enrayer le recul des recrutements de chercheurs et enseignants chercheurs instrumentalistes. Cela passerait notamment par la valorisation de la dimension instrumentation dans les profils. Dans le recrutement d'ingénieurs de recherche mais aussi l'appui de thèse CIFRE par exemple.



Erwan AMICE / LEMAR / CNRS Photothèque

## 2. Recommandations

Poursuivre, étendre et amplifier le travail entrepris dans le cadre de l'appel d'offre transverse INSU- EC2CO « écosystèmes d'interface fleuve-mer » pour pouvoir couvrir thématiquement plus largement les chantiers déjà ouverts et en ouvrir de nouveaux (petits fleuves côtiers, instrumentation, événements extrêmes...). Développer des chantiers régionaux (en France métropolitaine, Outre-mer et à l'international) intégrant les acteurs des différentes disciplines sur des points-chauds scientifiques constituant des verrous à notre compréhension du fonctionnement et de l'évolution des écosystèmes à l'interface Terre-mer.

Sur le territoire métropolitain, de nombreuses équipes de recherche en lien avec les acteurs locaux s'investissent dans l'étude de CITM sur la base de financements régionaux selon une logique de *challenge based research*. L'emprise territoriale des OSU constitue un avantage indéniable pour que ces structures soient au cœur des actions de concertation visant à faciliter les interactions entre les acteurs notamment au plan local.

Les approches Omics représentent la promesse de nouveaux indicateurs de l'état de santé des écosystèmes. La complexité et le coût des équipements de biologie moléculaire, ainsi que la rareté de l'expertise nécessaire à la mise en œuvre des différentes approches, justifient d'encourager une mutualisation et une coordination des moyens humains et instrumentaux, garante de la mise en œuvre rapide de ces mesures et de l'interopérabilité des données obtenues sur les différents continuums.

À l'échelle nationale, la création d'un groupe de travail faciliterait les échanges entre les différents systèmes étudiés. Ce groupe pourrait se voir confier la réalisation d'inventaires par continuum pour lister les manques et poser les bases de méta-analyses des CITM dont l'objectif pourrait être de concevoir un(des) modèle(s) conceptuel(s) de CITM et de dresser les contours d'observatoires idéaux de ces socio-écosystèmes. Son action devrait être concertée avec celle du réseau inter ZA.

L'effort doit également se poursuivre pour l'acquisition de savoirs et savoir-faire qui généreront le développement de plateformes de détection des nouveaux contaminants et vers une meilleure compréhension de leur devenir dans l'environnement.

### PROMOTION DES APPROCHES MODÈLE-DONNÉE

Par manque de concertation essentiellement, il ne se dégage pas de consensus sur la direction que doit prendre la communauté nationale sur une structuration générique ou

bien sur une structuration par continuum. Un programme national pour les travaux sur ces questions permettrait d'organiser la communauté sur ce point en vue de son positionnement international dans l'optique de la prochaine Décennie des nations unies pour les sciences océaniques.

### MOYENS À METTRE EN ŒUVRE

- Conserver des programmes nationaux pour conserver les moyens de développer de l'instrumentation, des nouveaux indicateurs, des études de processus en sciences de la nature
- Mettre en place les moyens de réaliser des mesures lors des événements extrêmes, et dans des conditions extrêmes (vagues énergétiques, fond vaseux, mangroves, banquise).
- Développer des chantiers régionaux intégrant les acteurs des différentes disciplines sur des points-chauds scientifiques constituant des verrous à notre compréhension du fonctionnement et de l'évolution des écosystèmes à l'interface Terre-mer. Cela est en cours dans le cadre de l'appel d'offre transverse INSU-EC2CO « écosystèmes d'interface fleuve-mer » mais il faudrait étendre cette approche pour pouvoir couvrir thématiquement plus largement les chantiers déjà ouverts et en ouvrir de nouveaux (petits fleuves côtiers, instrumentation, événements extrêmes...).
- Réseaux métier: développement d'observatoires et de nouveaux capteurs pour l'environnement. Par exemple, le milieu benthique, sa biogéochimie et sa composante haute fréquence sont mal étudiés car les observatoires peinent à se développer autour des paramètres pertinents.
- Afin de sortir des « systèmes tempérés occidentaux » (cf introduction), favoriser la participation (voire la mise en place) de chantier internationaux en collaboration avec d'autres nations, par exemple les LMI et collaborations internationales IRD avec le Vietnam ou le montage d'un effort *Source-to-sink* sur les fleuves asiatiques (USA-CN-FR).
- OSU, convention cadre, charte de recherche comme sésame pour accéder à des co-financements régionaux. Attention à l'inégalité entre régions et entre les disciplines.
- Observatoires idéaux: intégrés sur le continuum, interdisciplinaires, pérennes, autoévolutifs, connectés, sobres fournissant des données idéales incluant une dimension humaine et participative.
- Bancarisation des données, assurer l'interopérabilité dans le cadre d'IR comme Data Terra
- Inventaire des données multisources locales, archives historiques qui pourraient être confiés aux OSU.
- Archives sédimentaires, historique, *specimen bank* pour analyses rétrospectives.

- Projet de SNO Observil (OSUNA).

### COLLABORATIONS AVEC D'AUTRES INSTITUTS ET AVEC D'AUTRES PARTENAIRES

- L'étude du socio – écosystème du continuum implique l'interfaçage avec les sciences de l'Homme et avec les acteurs des territoires questionnant la coordination des politiques INEE, INHS, INSU par exemple au niveau des ZA et OHM
- Rôle des instituts pour accompagner la mise en œuvre des directives cadres DCE DCSMM

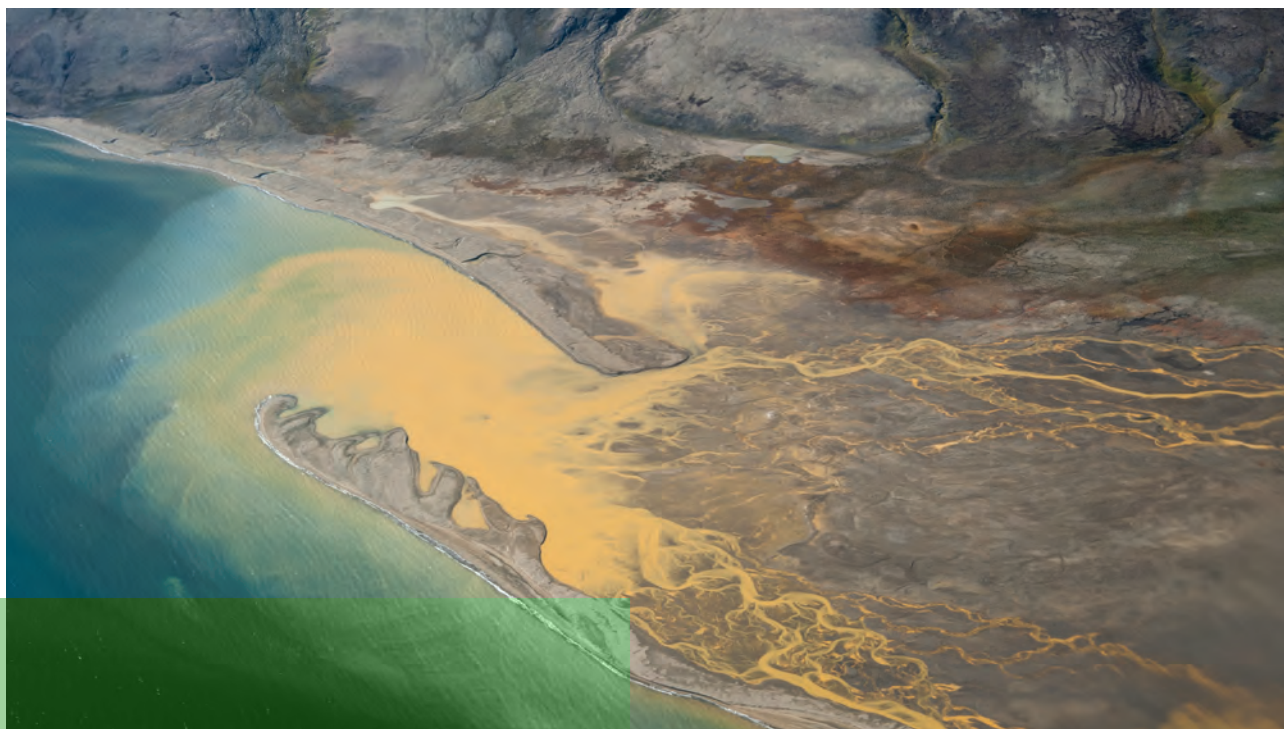
### OUTILS DU FUTUR

- Communication, coordination, phasage, décloisonnement entre ILLICO et OZCAR. Si la prospective SIC évoque l'importance de ces structures, nos échanges ont mis l'accent sur la nécessaire synergie entre ces structures au sein de l'INSU
- Dans l'attente des futures générations d'ordinateurs permettant un saut quantitatif en termes de puissance de calcul, promouvoir le développement des codes communautaires et des collaborations et approche interdisciplinaire entre maths appliqués, informaticien et sciences de la Terre (e.g. SIROCCO)

- Des compétences en ingénierie statistique et informatique requises dans un cadre plus large qui serait l'analyse de données massives (dont l'identification d'événements rares est un exemple)

### COMPÉTENCES DU FUTUR

- Diversification des missions des ingénieurs, chercheurs, et enseignants – chercheurs. Après les enseignants-chercheurs les médiateurs-chercheurs ou chercheurs augmentés pour co-construire des connaissances et suivre l'exemple de *Knowledge Action Networks*. Évolution des mentalités, et mesure d'adaptation comment changer la temporalité de l'occupation de l'espace. Cela sous-entend aussi une évolution des outils d'évaluation des chercheurs pour prendre en juste compte la valeur de ces nouvelles compétences
- Chercheurs et enseignants-chercheurs instrumentalistes: ne se présentent plus au concours de recrutement... par rapport à des modélisateurs qui ont plus de recul ou mieux valorisé leurs années en recherche... Valoriser la dimension instrumentation dans les profils... Étendre le référentiel des enseignants-chercheurs à ces nouvelles missions d'observation, d'instrumentation.



Erwan AMICE / LEMAR / CNRS Photothèque

# Défi 11

## Environnements urbains

**Conseil scientifique:** B. Béchet, M. Beekmann, G. Foret, G. Lefebvre,  
J. Leymarie, V. Masson, L. Oudin, S. Payan, L. Segalen, B. Tassin



Hervé THERY/CREDA/CNRS Photothèque

# 1. Enjeux scientifiques

## IMPACT DES CHANGEMENTS GLOBAUX (CLIMAT URBAIN, SANTÉ, BIODIVERSITÉ...) SUR L'ÉVOLUTION URBAINE

Cet atelier a traité des questions des avancées nécessaires pour améliorer la compréhension et la quantification des impacts liés à l'urbanisation à plusieurs échelles spatio-temporelles. On y retrouve les grands impacts environnementaux de l'urbanisation sur l'air, l'eau, les sols, la biodiversité, l'énergie et le climat régional avec des impacts sanitaires (pollution de l'air, sécurité alimentaire, nouveaux contaminants...) et des conséquences sur le milieu non urbain.

### Quels sont les impacts de la ville sur les ressources (eau, air, sol, alimentation...) et les risques ?

Diverses pressions sont exercées en ville et représentent les « drivers » des changements (globaux et locaux). La ville est le lieu de concentration de l'usage des ressources et de la génération de déchets. Le métabolisme urbain est en interaction avec le milieu extérieur avec des échanges de matériaux, de productions agricoles, d'eau et d'énergie. L'évolution de la forme urbaine peut avoir des conséquences sur l'utilisation de ces ressources. Par exemple, lors d'opérations d'aménagement, des terres excavées sont exportées alors que de la terre végétale et la ressource en eau vont être utilisées en quantité importante pour la végétalisation (réduction des îlots de chaleur). Le milieu urbain contient des organismes vivants introduits par l'Homme ou spontanés, et qui constituent des écosystèmes particuliers. L'évolution des pratiques de consommation, de construction, des formes urbaines, des transports et des mobilités sont consommatrices d'énergie et contribuent à dégrader la qualité de l'air, de l'eau et des sols. En affectant tous les compartiments, les activités anthropiques perturbent les cycles biogéochimiques et introduisent de nouveaux risques (inondation, îlots de chaleur). La densité et l'hétérogénéité des espaces urbains impacte fortement le bilan de ces perturbations : d'une part la haute densité résidentielle constitue un facteur aggravant des impacts sanitaires attendus, d'autre part la variabilité spatiale induit des inégalités d'exposition aux nuisances qui s'ajoutent potentiellement à la vulnérabilité sociale de certaines catégories de population. L'étude de ces impacts est complexe et intrinsèquement pluridisciplinaire.

### Quels risques émergents dans les environnements urbains ?

L'intensification des risques climatiques aura des conséquences sur les environnements urbains en particulier sur les villes littorales qui présentent les plus fortes croissances.

Ceci doit entraîner un développement des systèmes de gestion des situations de crise (et post-crise). Des polluants émergents apparaissent suite à l'introduction massive de nouvelles substances et de leurs produits de dégradation dans l'environnement (pesticides, médicaments, produits de substitution, nanoparticules). Par ailleurs, l'effet « cocktail » d'exposition multi-contaminants est encore mal évalué dans les études toxicologiques et épidémiologiques. L'utilisation ou la génération de microparticules peut amplifier les impacts. L'évolution des précipitations et des températures peut accentuer les effets de l'imperméabilisation des sols. Le milieu urbain est aussi le lieu d'introduction – intentionnelle ou non – d'espèces exogènes qui peuvent devenir invasives et nuisibles, générer des flux de gènes, provoquer des pertes de biodiversité. L'évolution urbaine suscite de nouveaux usages des ressources locales (agriculture urbaine, production d'énergie, réutilisation des eaux grises...) et modifie les modes de vie, induisant de nouvelles formes de risques (sanitaires ou sociaux) pouvant même provoquer l'émergence de nouvelles maladies. L'évolution du numérique peut représenter des potentialités importantes d'optimisation des usages de la ville (mobilité, consommations, accès aux services et aménités...) mais représente aussi une augmentation des consommations énergétiques et des ressources. Se posent également les questions de l'usage et des égalités d'accès au numérique, de son appropriation et de sa perception en tant qu'outil de régulation des comportements et de ses conséquences liberticides. Enfin, la volonté d'utiliser la forme et l'organisation urbaines comme un outil de durabilité et un élément des politiques de transition énergétique est susceptible de générer des inégalités en lien avec les risques sociaux déjà subis par certains groupes de la population.

## ADAPTATION (COMMENT CONSTRUIRE ET AMÉNAGER LES VILLES DE DEMAIN ?)

Cette thématique traite des adaptations nécessaires afin de limiter l'impact des changements globaux et notamment du dérèglement climatique sur le milieu urbain (canicules, inondations, sécheresses...). Bien sûr une augmentation de population urbaine et des activités économiques génèrent des pressions supplémentaires sur l'environnement. Si certaines des mesures d'adaptations proposées sont déjà bien évaluées, des lacunes de connaissances ou un manque d'évaluation globale existent pour d'autres.

### Les processus et leurs imbrications et rétroactions

Ici, l'objectif est de savoir décrire si possible de façon quantitative l'ensemble de la chaîne de processus allant des changements globaux jusqu'aux impacts dans le milieu ur-

bain (santé, habitabilité...). Cette connaissance est nécessaire pour évaluer la pertinence des mesures d'adaptation face à des impacts négatifs.

Le périmètre des processus est celui des cycles biogéochimiques comprenant le système atmosphère – eau – sol – végétation (ou d'autres formes du vivant) en interaction avec le bâti et les infrastructures urbaines.

La végétalisation des espaces urbains est une des mesures phare d'adaptation : s'il est reconnu qu'elle a un effet globalement positif sur l'atténuation des canicules et une diminution des risques de ruissellement urbain, beaucoup de connaissances restent encore à acquérir : sur la localisation et la forme des espaces végétalisés (murs, toitures, etc.), sur les espèces à utiliser (résistance, efficacité, entretien...). Une méthodologie d'évaluation intégrée des effets de la végétalisation en ville reste encore à développer : impact sur les canicules, impact sur le cycle de l'eau, impact sur la biodiversité, impact sur la qualité de l'air (positif par le dépôt de nombreux polluants sur la surface végétale, négatif par des émissions précurseurs de particules fines, ou par une diminution de la dispersion des polluants), impact enfin sur le bien-être (qu'il faudra pouvoir mesurer). Le phyto-remédiation de la végétation pour assainir des sols urbains pollués par des métaux ou hydrocarbures reste une technique intéressante, mais souvent trop lente et pas assez efficace. Ainsi, des approches pour maîtriser les risques sont également à développer.

Il sera également nécessaire de développer les études sur le métabolisme urbain : quantifier les flux d'eau, de matière et d'énergie, en considérant que ces flux sont liés, définir également les bilans et les recyclages potentiels.

La caractérisation de l'exposition par rapport à des nuisances en ville reste encore lacunaire, par exemple pour la pollution de l'air, due à son hétérogénéité et le croisement nécessaire avec les temps de résidence des citoyens et citoyennes en différents lieux. Les liens entre pollutions/nuisances et effets sur la santé restent à systématiser, en prenant en compte l'ensemble des fonctions du corps humain, y compris celles mentales. L'approche de l'exposome décrivant l'ensemble des stress environnementaux est pertinente pour le milieu urbain. À cet égard, il reste à mieux investiguer comment l'organisation de la ville et les formes urbaines (densité, habitat, mobilité, offre culturelle, végétalisation...) peuvent être source de stress et de contraintes ou au contraire de bien-être.

### **Gouvernance, l'acceptabilité et le changement des pratiques**

La gouvernance et les prises de décisions peuvent aujourd'hui suivre une logique « multi-acteurs » incluant collectivités, entreprises, société civile, et chercheurs. Le projet de démonstration de l'écoquartier La Vallée à Chatenay-Malabry en est un exemple, avec la volonté d'une co-construc-

tion multi-acteurs. Ce type de projet soulève la question du positionnement du chercheur dans un triptyque nomenclature action opérationnelle-citoyen-connaissance scientifique.

Les travaux de recherche doivent contribuer à l'évaluation globale des effets de décisions politiques, par exemple en développant des indicateurs pertinents et opérationnels. Des volets appliqués de la recherche devraient permettre de contribuer à l'élaboration d'outils réglementaires.

La question de l'acceptabilité sociale des solutions d'adaptation et des impacts négatifs liés aux changements globaux est identifiée comme importante. Comment notamment s'adapter à un monde avec moins de ressources ou des ressources modifiées ? Un suivi en temps réel pour évaluer les changements de pratiques paraît essentiel.

Le monde de la recherche pourrait intervenir également sur un mode de recherche-action dans des projets qui viseraient à recréer du lien entre habitants/citoyens et leur environnement, ceci par exemple au travers d'actions liées aux énergies renouvelables ou au recyclage de l'eau.

Enfin, le périmètre de la gouvernance urbaine doit-il inclure les régions rurales avoisinantes, comment penser les développements urbains et ruraux ensemble ? Pour pouvoir répondre à cette question, et à d'autres dans cette rubrique, la mise en œuvre d'approches transversales entre milieux et entre disciplines est nécessaire. Les approches à mettre en œuvre dépassent largement le périmètre de l'INSU.

### **MITIGATION : QUELLES TRANSITIONS, RUPTURES NÉCESSAIRES ?**

La mitigation est la mise en œuvre de mesures destinées à réduire les dommages associés à des risques naturels ou générés par les activités humaines. C'est une action qui vise aussi bien la réduction de l'intensité des aléas (vagues de chaleur, inondations, pollution des sols, des eaux et de l'air, etc.) que la réduction de l'exposition à ces aléas et la vulnérabilité des populations. Elle constitue certainement l'objectif le plus ambitieux poursuivis par la recherche bien que la recherche n'a pas pour fonction de mettre en œuvre des mesures. La recherche a en revanche l'ambition de définir des mesures efficaces aux coûts supportables par nos sociétés.

La prise de conscience progressive des sociétés de leurs impacts sur l'environnement, suivie par des législations imposant la mise en place de mesures de mitigation, a contribué à ce que tous les secteurs d'activités proposent et implémentent des solutions de mitigation. Devant l'urgence climatique, les atteintes à la biodiversité, les conflits autour des ressources (énergétiques, métaux rares, etc.), et l'accroissement des inégalités sociales, les propositions à la mitigation sont attendues encore plus vivement que précédemment. Certains vont jusqu'à se poser la question de la nécessité de passer de la transition à la rupture, de manière

à ce que cette rupture soit un choix et pas une contrainte qui risque de s'imposer à tous.

Force est de constater que plusieurs collectivités en charge de la gestion des environnements urbains s'organisent pour collecter les idées de mitigation au sein de tous les corps de métiers, et les implémentent. La recherche parfois sollicitée pour aider à la décision constate le plus souvent que l'évaluation de l'effet intégré potentiel des propositions et des décisions n'a pas été démontré en amont. Pourtant les actions devraient être optimisées car les décisions peuvent avoir des effets sur le long terme, les financements manquent, et les sociétés devraient concentrer leurs moyens sur des solutions orientant rapidement (30 ans) la planète vers la neutralité carbone.

Les défis identifiés par la recherche sur la mitigation portent sur les modes de vie, l'ingénierie écologique, l'évaluation intégrée des stratégies de mitigation, l'action publique et citoyenne.

Les modes de vie, allant des modes de production, de consommation, de recyclage, et de traitement des déchets doivent être étudiés en s'attachant à évaluer leurs impacts sur l'environnement, et à identifier les nouvelles potentialités d'utilisation de bio-ressources, de ré-utilisation & recyclage des matériaux, et de sobriété (matière première, énergie et déchets, émissions de polluants). Tous les secteurs d'activités (agriculture, alimentation, déchets, énergie, mobilité, habitat, etc.) doivent être étudiés en s'attachant à accompagner les nouvelles pratiques vers l'efficacité et le multi-services.

Les solutions de mitigation apportées par l'ingénierie écologique doivent assurer la qualité des environnements urbains, c'est-à-dire aussi bien la qualité de vie des populations urbaines, mais aussi la qualité des milieux. Il est entendu que la qualité des milieux tend à optimiser leur fonctionnement et les services écosystémiques rendus tout en minimisant la nécessité de gestion humaine. La végétalisation et la préservation (ou réintroduction) de la faune est un exemple d'action de mitigation des risques dont les effets restent à étudier, en s'attachant à évaluer aussi son impact sur la qualité de l'air, et dans un autre registre sur les choix résidentiels et les pratiques de mobilité des individus.

De manière générale, l'évaluation des stratégies (série de mesures) de mitigation doit se faire de manière intégrée, à diverses échelles, sur un panel d'indicateurs couvrant l'ensemble des dimensions, environnemental, social, sanitaire et économique. Les politiques de mitigation, stabilisées dans le temps, ne seront efficacement définies que si les mesures possibles proposées aux décideurs sont associées à des évaluations et comparaisons des impacts sur l'ensemble des champs de leurs périmètres d'action. Ainsi, comme les stratégies climatiques et de la qualité de l'air ne peuvent plus être dissociées des stratégies énergétiques, les stratégies énergétiques ne sont plus dissociables non

plus des stratégies urbaines portant sur la mobilité et le bâtiment dès lors que des transformations majeures sont attendues dans un futur proche (accroissement du nombre de véhicules électriques, de l'utilisation de la climatisation, etc.).

Enfin, la mise en œuvre de la mitigation est à étudier dans son contexte d'influence mutuelle des divers acteurs (citoyens, associations, chercheurs, industriels, gestionnaires, décideurs) à diverses échelles spatiales (locale, régionale, nationale, européenne, internationale), et dans la recherche de solutions de mitigation permettant d'accompagner la mobilisation de tous vers une transition la plus égalitaire et la moins abrupte possible. Étudier les rôles des gestionnaires et décideurs dans les actions publiques de mitigation est important, tandis que le rôle du chercheur dans l'action publique, sa stabilité et sa pérennité est aussi à questionner.

Les défis de la mitigation ne pourront être relevés que si la force de la communauté scientifique INSU, qui reste la rigueur de l'analyse des processus physico-chimiques de chaque compartiment planétaire et des cycles biogéochimiques les impactant, est mise aussi à contribution de la recherche de solutions intégrées en lien avec d'autres disciplines scientifiques et acteurs opérationnels.

La participation de la recherche à la mitigation souffre encore de la segmentation des spécialités, du peu de temps et de moyens accordés pour travailler dans l'interdisciplinarité, qui sont liés au manque de reconnaissance de la valeur des recherches interdisciplinaires. Les solutions de mitigation déployées dans les environnements urbains pouvant impacter plusieurs fonctions des espaces urbanisés sont très rarement évaluées en amont. Ceci est certainement dû au fait que les études des réponses du socio-écosystème (SES) «ville» face à des transformations manquent encore de connaissances sur les ressources nécessaires à la viabilité de ce SES, sur les processus physico-chimiques et cycles biogéochimiques qui s'y opèrent dans un contexte de forte hétérogénéité, aussi sur les relations entre les diverses composantes de ce SES (incluant l'humain par définition). Les observations aux interfaces et les outils intégrés d'analyse des stratégies sont à développer pour guider le choix sur la base de multiples indicateurs. Il faudra certainement revoir le concept de la durabilité pour qu'il soit compatible avec de nouvelles conceptions du développement de nos sociétés, et construire les indicateurs appropriés également. Bien que l'évolution du comportement et des pratiques des individus soit difficile à appréhender, une mise en scénarios doit s'organiser à différentes échelles et résolutions pour appréhender l'exposition, l'inégalité sociale, et les conditions de la vulnérabilité.

Ces études pourront être renforcées, gagner en réalisme et temps de transferts en rapprochant la recherche des divers acteurs de la société (industries, collectivités, décideurs) et en favorisant les co-constructions d'outils et de méthodes permettant de définir des actions de mitigation efficaces

et pérennes. Les enseignements et les formations interdisciplinaires devront être renforcés. Intégrer plus encore les efforts que développent les citoyens dans l'observation et l'action, devrait permettre d'accélérer la transition de nos sociétés vers des modes de vie plus durables, et éviter les ruptures.

## QUEL OBSERVATOIRE FUTUR DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN ?

La problématique posée lors de cet atelier : « quel observatoire futur de l'environnement urbain » a largement questionné la communauté sur les moyens à mettre en œuvre pour faciliter et/ou développer les approches systémiques et intégrées de l'environnement urbain.

Il est apparu qu'un tel observatoire devait permettre la mise en œuvre de moyens pour assurer des recherches interdisciplinaires mêlant les spécificités de recherche de l'INSU (bio, géochimie, physique, etc.) à des disciplines telles que l'histoire (analyse sur le temps long), la géographie de l'environnement, les sciences humaines et sociales, la santé... Les notions de socio-écosystème et de zone critique ont été discutées comme des axes de recherche forts permettant de structurer et de fédérer la communauté scientifique autour de l'observation en environnement urbain.

Les enjeux identifiés autour d'un tel observatoire reposent bien entendu sur la haute qualité de l'observation, impliquant la métrologie et l'instrumentation indispensables à ce type de structure. Un point abordé en préambule souligne l'importance de penser cet observatoire en amont. Dans un contexte actuel de changement global, il est essentiel de concevoir l'instrumentation et les observations en lien étroit avec les sorties actuelles ou attendus des modèles physiques, (climatique, atmosphérique, hydrologique...), afin d'assurer la cohérence entre observation et modélisation des processus environnementaux. Ce qui n'est pas toujours le cas dans les observatoires existants.

La co-localisation des sites ou la définition d'un document cadre définissant les conditions de mise en œuvre de la mesure a été abordée comme étant un prérequis nécessaire à toute instrumentation. L'objectif est ici de garantir une inter-comparaison des sites dans les meilleures conditions et ceux pour les différents types de mesures effectuées. La temporalité de la mesure a été également discutée tant sur les aspects fréquence d'enregistrement que sur la dimension enregistrement sur le long terme. La nécessité d'une haute densité spatiale et temporelle de la donnée a été largement commentée et les aspects de capteurs à bas coût et de données participatives ont été évoqués comme des solutions pertinentes pour certain type de mesures. Il a été rappelé que les données obtenues dans des campagnes de sciences citoyennes, bien qu'elles soient souvent caractérisées par une justesse et une fidélité inférieure, sont complémentaires aux données couramment réalisées au sein des observatoires et représentent une alternative in-

téressante pour la densification de certains réseaux de mesures. L'intégration de ces nouvelles données citoyennes dans un service d'observation pour lequel la fiabilité et la robustesse des mesures en place sont bien établies doit être bien réfléchi en questionnant par exemple leur exactitude. La communauté de chercheurs souligne donc la nécessité d'accompagner ces nouveaux modes de production de données pour assurer une exploitation adaptée de celles-ci.

Le cas particulier des événements extrêmes et du suivi de ceux-ci a également été soulevé. Il pourrait être un axe de réflexion de l'observatoire, dans la mesure où les instrumentations courantes se révèlent dans certains cas inadaptées à l'intensité d'un événement. Il s'agirait ici d'initier des réflexions sur la mise en place de réseaux métiers « d'urgence » assurant la mise à disposition de matériel (et de personnel) pour réaliser les campagnes de mesures adaptées à l'intensité et à la rapidité d'un événement (suivis de mouvement de terrain, événement climatique, submersion marine, accident industriel impactant les qualités de l'air, de l'eau ou des sols...).

Au-delà de la production de donnée, l'essence même d'un tel observatoire devrait être la mutualisation de l'ensemble de ses productions matérielles et immatérielles tel que : les données, les moyens, les méthodes et les savoir-faire pour garantir à l'ensemble des partenaires le même socle de connaissance.

Ce transfert de connaissance est également indispensable vers les gestionnaires de territoire et le citoyen. Une large discussion a été menée sur l'importance de faire de la recherche-action participative ou collaborative et sur le caractère essentiel de développer avec les gestionnaires et les citoyens les questions de recherche menées au sein de l'observatoire. L'objectif pourrait être de développer des réseaux d'acteurs à différentes échelles (mise en réseau des villes/métropoles, des différents acteurs fournisseurs de données, des associations citoyennes,) permettant de développer des services et des outils d'aide à la décision intégrés à l'action publique. La place des acteurs privés a également été évoquée comme étant des acteurs stratégiques dans la production de données et dans la mise en œuvre de certaines politiques publiques. Les écosystèmes économiques de chaque site étant différents seuls les acteurs type agence de l'eau ou de l'énergie ont été identifiés comme acteurs commun pour un tel observatoire.

## LIENS ENTRE CONNAISSANCE ET DÉCISIONS/ ACTION PUBLIQUE

Nous questionnons ici le lien entre connaissance scientifique et action publique dans le domaine des « environnements urbains » et de leurs évolutions dans le contexte du changement climatique, du développement durable, de la ville intelligente (« smart city ») et des évolutions démographiques. Cette question peut s'élargir à la place du chercheur dans la société et déborde bien sûr de ce champ

thématique. On doit d'ailleurs noter que ces deux sphères (« recherche » et « politique ») subissent actuellement une forte crise de légitimité vis-à-vis des citoyens et acteurs socio-économiques ce qui pèse bien sûr sur ce lien connaissance scientifique/action publique.

L'étude de l'environnement urbain est nécessairement pluridisciplinaire (air, eau, sols, bâtiments, urbanisme, transports, sociologie, santé, énergie...). Ce champ d'étude est très fortement connecté à la société avec une importante dimension locale et nécessite de ce fait une approche intersectorielle connectant recherche, collectivités territoriales, politiques, agences, acteurs opérationnels, entreprises et citoyens.

Dans ce contexte, on doit comprendre quelle est le rôle du chercheur et son poids dans la décision publique (recherche appliquée, recherche impliquée). On doit identifier comment évolue ce positionnement et quelles sont les actions que nous devons mettre en œuvre pour être plus efficace dans ce domaine.

La connaissance scientifique n'est pas absolue, ni figée et dans les sciences de l'environnement elle est d'ailleurs souvent associée à la notion d'incertitudes ce qui constitue un challenge pour transférer cette connaissance vers la société comme les controverses dans le domaine des sciences du climat l'illustrent. Les chercheurs produisent un savoir avec une démarche et une méthodologie spécifique qui nécessitent de prouver que la science produite répond à certains critères de robustesse. Cela a d'ailleurs souvent comme conséquence une temporalité plus longue que celle parfois réclamée par la société, les citoyens.

Le chercheur n'est pas hors sol, il est dans la société et, au final, le savoir produit est donc lui aussi influencé par ces liens qu'ils soient d'ordre financiers, politiques ou plus personnels. Le chercheur peut d'ailleurs choisir d'être un acteur des transformations de la société et ne pas laisser ce rôle aux acteurs opérationnels, politiques ou autres. Les « savoirs savants » (scientifiques) sont en compétition, ou du moins coexistent de fait, avec d'autres formes de savoirs (experts, ordinaires) qui ne sont a priori pas moins légitimes (en tout cas en ce qui concerne les environnements urbains qui nous occupent ici).

L'action publique de son côté ne se réduit pas à des décisions politiques (éclairées par la Science) mises en œuvre de manière conforme et a priori transparentes dans leurs effets. *A fortiori* en situation d'incertitude forte. Elle est appropriée, interprétée, modelée par des acteurs parties prenantes au filtre de leurs valeurs, de leur position sociale, de leurs intérêts et de leurs anticipations en matière d'avenir désirable ou indésirable. La crise liée à la pandémie de COVID19 ne l'a que trop bien illustré. Les limites de l'action publique (écart entre les objectifs visés et les résultats observables) et la crise de légitimité des acteurs publics se nourrissent mutuellement.

On est sorti (si on n'y a jamais été) d'un partage entre science (activité pourtant sur l'étude de ce qui est ou serait sous certaines hypothèses) et politique (activité portant sur ce qui devrait être et comment le faire advenir). L'interpénétration des différentes sphères implique probablement plus d'interactions entre elles, notamment il apparaît important de former les décideurs par la recherche et recruter des docteurs dans les sphères de décision. Consacrer davantage d'énergie collective à la formulation et à la compréhension des problèmes (logique de recherche), pour que l'énergie collective consacrée à la résolution des problèmes (logique d'ingénierie, logique administrative ?) soit mieux employée (de manière plus pertinente).

Les controverses en lien avec la décision publique ou même la connaissance scientifique et son utilisation dans l'action publique sont nombreuses. Elles ne doivent pas être considérées comme un frein, elles sont au cœur de l'activité scientifique et le développement des controverses doit rendre plus solide la construction de l'action publique. Une situation problématique traitée par la voie d'une controverse en ressort mieux articulée dans ses composantes et consolidée dans ses effets sur les acteurs et les issues.

Enfin, et on l'a déjà souligné, les approches intégrées doivent Ouvrir les possibles dans la construction des futurs. Explorer les conséquences de tel ou tel choix collectif. Ici les sciences humaines, les sciences de l'environnement et de santé et les sciences de l'ingénierie sont toutes précieuses – a fortiori si elles peuvent collaborer – dans un dialogue avec décideurs, parties prenantes, citoyens, artistes...

C'est dans ce cadre que les chercheurs pourront utilement contribuer à la définition des politiques de transition écologique qui apparaissent aujourd'hui indispensable, dans le domaine des environnements urbains comme plus largement.

## UN CHANTIER POUR LA VILLE

La communauté scientifique doit se regrouper de façon très pluridisciplinaire pour travailler en interdisciplinarité pour étudier les systèmes urbains et essayer de constituer une communauté des « sciences urbaines » qui est très mal structurée de l'échelle nationale à l'échelle internationale. Pour répondre à cet objectif, la mise en place d'un chantier peut être utile. Le croisement des échelles spatiales et temporelles est indispensable pour progresser dans la compréhension du fonctionnement des systèmes urbains.

Un chantier sur la ville doit permettre de déployer des travaux sur des périodes relativement longues supérieures à 10 ans pour pouvoir acquérir des données, des résultats, suivre des impacts sur des durées pertinentes par rapport à l'action publique et la réponse des systèmes urbains. Il doit être positionné sur des approches systémiques en privilégiant l'étude de l'objet urbain ou du système urbain dans toute leur complexité.

## Des caractéristiques spécifiques

Le chantier doit être un lieu d'intégration et de facilitation de travaux interdisciplinaires indispensables à l'étude des systèmes urbains. Il s'agit d'aller au-delà des juxtapositions d'approches mais de croiser les problématiques et les méthodes pour aboutir à des connaissances originales et pertinentes sur ces systèmes. Le chantier doit donc nécessairement être construit entre les instituts du CNRS (SHS, INSIS, INEE, INSU, etc.) et se donner le temps de faire émerger les travaux interdisciplinaires.

Ce chantier doit proposer un cadre d'activité adapté à ces systèmes complexes, multi-acteurs et qui évoluent avec des dynamiques temporelles très rapides. Il se doit donc de :

- accepter les erreurs, se donner la possibilité d'essayer ou de tester de nouveaux dispositifs ou de nouvelles méthodes ;
- accepter la prise de risque, la gestion des incertitudes et donc l'échec ;
- s'adapter au caractère évolutif des systèmes urbains, être souple dans son fonctionnement et dans le cadrage des actions développées. Être capable de réagir face à des enjeux émergents ou dans le croisement de questionnements.

Le chantier sur la ville doit obligatoirement y associer les acteurs opérationnels de la construction, la gestion et du développement urbain : il doit donc rassembler les chercheurs, les acteurs publics (aux différentes échelles), les acteurs économiques privés (start-up comme grand groupe) et les citoyens ou collectifs urbains. Le chantier et ses objectifs doivent être co-construits avec cette diversité d'acteurs. Cette modalité de fonctionnement pousse à positionner le chercheur et questionner son activité vis à vis des autres acteurs qui apportent également de la connaissance, des données, et proposent des approches innovantes sur les systèmes urbains.

Le chantier doit aussi pouvoir offrir et faciliter le déploiement d'une grande pluralité de méthodes et d'outils d'étude : observation et acquisition de données, enquêtes, modèles etc. Il doit développer la culture de l'évaluation et de la production d'indicateurs. Ces éléments doivent être pris en compte dès l'amont de projets spécifiques.

Les approches menées doivent aussi être multi-échelles et se déployer dans des contextes urbains très divers tant sur les plans climatiques, économiques, sociaux, politiques, environnementaux...

## Quelles formes ?

L'étude de la complexité du système urbain réclame une diversité de formes et de modalités de travail collectif et de modalité de projets :

- favoriser des groupes de travail transversaux (-inter instituts ?) et interdisciplinaires autour d'une question commune, d'une action (terrain, école thématique, projet...);
- favoriser l'émergence de pépinières de projets avec les partenaires sociaux et économiques ;
- favoriser la transmission des connaissances et accompagner l'évolution des métiers de la ville en formation initiale et continue.

Cette diversité doit se déployer de la même façon dans les cadres conceptuels utilisés :

- favoriser les travaux visant à construire un ou des schémas conceptuels partagés, permettant d'envisager un projet de sa genèse à son évaluation exposé ;
- favoriser une démarche de sensibilisation, anticipation et participation citoyenne ;
- capitaliser sur les connaissances produites : données, approches, modèles : favoriser la pérennité et la diffusion des données, leur diffusion et valorisation (*dataverse*, *data papers*), des modèles et approches, et leur développement, la comparaison ou le couplage de modèles ;
- valoriser les actions sur le long terme et la stabilité des relations avec les acteurs du territoire.

## 2. Recommandations

### IMPACT DES CHANGEMENTS GLOBAUX (CLIMAT URBAIN, SANTÉ, BIODIVERSITÉ...) SUR L'ÉVOLUTION URBAINE

Les participants ont identifié différents besoins nécessitant des moyens à long terme avec le développement d'observatoires pérennes. Ceux-ci permettront des diagnostics plus complets (multi-exposition par exemple), l'alimentation de bases de données épidémiologiques et le suivi des impacts suite à l'évolution de la ville et de ses aménagements. Ils doivent bénéficier de l'évolution de nouvelles instrumentations et d'études à très fine échelle. L'évolution de la métrologie (screening, empreintes chimiques, meilleures capacités de détection, échantillonneurs et capteurs mobiles individuels et en réseau,) permettra une meilleure perception et quantification des niveaux de contamination et d'exposition. De plus, ces suivis permettront d'évaluer les bénéfices ou désavantages des nouveaux aménagements afin de proposer des indicateurs susceptibles d'aider la prise de décision dans les villes pour promouvoir l'adaptation des hommes, des animaux et des plantes au changement climatique. Les sciences participatives peuvent aussi être mobilisées pour acquérir des données en masse utilisables par les chercheurs. Elles permettent de développer la communication vers le citoyen et d'opérer un retour expert vers l'aide à la décision qui doit être valorisée. Les études doivent être menées à différentes échelles spatio-temporelles (de l'individu à l'écosystème, de la parcelle à la région) pour comprendre la fonctionnalité des écosystèmes urbains et permettre de valider par exemple l'efficacité de l'ingénierie écologique.

Dans ce cadre, le développement de modélisations numériques intégrant différentes échelles de processus (du territoire dans sa globalité jusqu'à l'individu, c'est-à-dire son échelle spatiale et les déterminants de son exposition) constitue un verrou qu'il faudra lever. Des bilans globaux des impacts sont nécessaires en prenant en compte l'extérieur de la ville et les zones de transition (ex gestion des sols urbains et péri-urbains, dépendance alimentaire de la ville à son hinterland). Ceci va générer des données massives qui vont demander une gestion et une analyse des bases de données générées. Ceci permettra de développer des approches couplées observation / modélisation. Une approche interdisciplinaire doit être favorisée, associant par exemple génie civil et urbanisme, à l'économie, la géographie, la sociologie, la santé, l'écologie, les sciences du climat et de l'atmosphère... Ceci nécessitera des approches inter-instituts (INSU, INEE, INSHS, INSIS, INSERM, INSB, Inrae, IRD). Cela devra donc être associé à des aides de structuration de la communauté nationale (GDR et gros projets interdisciplinaires) et de la communauté internationale.

Le partage d'expériences avec des villes du Sud déjà soumise à des fortes pressions (température, eau, qualité des sols...) (collaborations avec l'IRD, la Chine, le Sénégal par exemple) ainsi que des analyses rétrospectives/historiques de différentes solutions d'aménagement pourront aussi être intéressantes. Les projets actuels se concentrent essentiellement sur les grandes villes mais des villes moyennes devront également être étudiées avec leurs spécificités. Pour développer les études de l'environnement urbain, il faut favoriser les liens avec les acteurs et valoriser l'expertise des scientifiques afin de créer une communauté d'experts reconnus permettant une réelle évaluation des politiques publiques. Des outils juridiques peuvent être des leviers de ce changement ainsi que la reconnaissance des parcours scientifiques sur l'urbain, très souvent multidisciplinaire, donc spécifique.

### ADAPTATION (COMMENT CONSTRUIRE ET AMÉNAGER LES VILLES DE DEMAIN ?)

#### Techniques et outils à développer

Les travaux envisagés seraient grandement facilités par la disponibilité de données multi thématiques et multi échelle dans des bases de données partagées. Des manques de données sont identifiés, telles que des séries résolues dans le temps de certaines variables hydrologiques pour pouvoir investiguer des événements extrêmes. Ces analyses sur les extrêmes nécessitent de pérenniser l'acquisition de données long-terme (développement des observatoires en milieu urbain).

En parallèle, l'émergence de données participatives est un atout pour l'acquisition de données sur les milieux urbains, avec une représentativité spatiale plus importante, mais des incertitudes à prendre en compte (exemple des capteurs pour mesurer l'exposition à la pollution de l'air et la qualité de l'air intérieur).

Pour la modélisation des mesures d'adaptation, plusieurs défis se posent : (i) la descente d'échelle, notamment pour traduire l'impact du changement climatique global et sur des microclimats urbains, (ii) le couplage des modèles physiques avec des modèles de mobilité et de comportement, et enfin (iii) la simplification des modélisations pour les rendre applicables à des fins opérationnelles et utiles pour l'aide à la décision.

Un défi spécifique est identifié pour les sciences des matériaux pour trouver des solutions de rafraîchissement au niveau de l'habitat dans le but d'éviter l'utilisation massive de la climatisation dans un futur climat plus chaud, mais aussi

globalement dans les milieux construits, en tenant compte des interactions avec le milieu naturel.

### **Pistes sur l'organisation de la recherche**

Résoudre les défis de cette prospective suppose des approches systémiques et interdisciplinaires. Des appels d'offres interdisciplinaires existent, mais le plus souvent pour des projets émergents avec des financements assez faibles. Il faudrait créer à l'échelle nationale des possibilités de financements plus substantiels et plus pérennes.

Au-delà de la recherche, la formation des acteurs de la ville est indispensable, des outils pédagogiques sont à développer dans ce sens, et cette activité doit être reconnue dans la carrière des chercheurs.

### **QUEL OBSERVATOIRE FUTUR DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN ?**

Un observatoire en environnement urbain devrait intégrer le réseau OZCAR au niveau national et assurer un lien fort avec les réseaux de ZA et des OHM. Il est indispensable qu'un tel observatoire soit appréhendé de manière interdisciplinaire et multi-tutelle pour garantir une vision intégrée de l'environnement urbain. Pour cela, il pourrait être envisagé d'ouvrir des appels à projet de recherche de la mission interdisciplinaire du CNRS pour fédérer les équipes de recherche sur cette thématique. De la même manière, il est indispensable d'associer les acteurs publics aux fonctionnements d'un tel observatoire par une participation active dans la gouvernance, mais également par un conventionnement assurant un financement complémentaire à celui du CNRS. La pérennité d'un tel observatoire repose en outre sur un investissement à long terme des différents partenaires, mais également sur la capacité du CNRS à fournir des services mutualisés de stockage des données, de diffusion et de portée à connaissance des recherches menées sur un tel observatoire.

Un tel observatoire prenant la forme d'un chantier INSU ou d'un Service National d'Observation permettrait à la communauté de se structurer d'avantage et combler un manque dans le paysage institutionnel national. Un tel outil serait complémentaire aux autres réseaux institutionnels du CNRS : RZA, OZCAR, OHM, et au-delà avec un lien très fort avec le pôle de données spatiales THEIA du CNES mais également au niveau européen dans le cadre du projet European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI).

### **UN CHANTIER POUR LA VILLE**

#### **Faire un état des lieux des initiatives ou projets existants**

De nombreuses initiatives ou projets de recherche-action se développent en France et dans le monde à l'initiative du milieu académique ou des acteurs opérationnels publics ou des citoyens. Il est nécessaire de faire un bilan de ces initiatives (exemple de l'Advanced Metropolitan Institute d'Ams-

terdam) et d'avoir des retours d'expérience pour juger de la pertinence des différents modèles existants.

### **Organiser un workshop inter-institut**

Le bilan effectué préalablement pourrait être présenté lors d'un workshop très interdisciplinaire dont l'objectif serait de cadrer les objectifs et spécificités d'un chantier sur la ville. Il doit rassembler une diversité de chercheurs et d'acteurs de la recherche, recherche-action, démonstration urbaine et s'attacher à produire un projet de chantier co-construit entre ces participants.

### **Proposer une école thématique nationale**

Parallèlement au workshop, l'organisation d'une école thématique sur la ville, très interdisciplinaire peut être un cadre intéressant pour croiser les approches et les questionnements actuels sur ces systèmes.

### **Interagir avec les acteurs de la recherche et de l'innovation sur la ville**

Travailler de façon structurée avec les projets déjà existants et financés, en particulier profiter des nombreux projets financés par les PIA qui se focalisent sur la thématique de la Ville en France pour ancrer les réflexions à partir de réseaux déjà existants qui bénéficient de financements publics importants. On peut citer en premier bilan rapide :

- Initiative d'excellence Isite FUTURE porté par l'Université Gustave Eiffel sur « Les villes de demain »
- Des labex : Intelligence des Mondes Urbains, Futurs Urbains, Matériaux Multi-échelle pour la Construction Durable, etc.
- Institut de convergence : École Urbaine de Lyon
- Les projets TIGA (Territoire d'Innovation de Grande Ambition)

Trouver et mobiliser des financements à la hauteur de l'ambition d'un chantier sur la ville

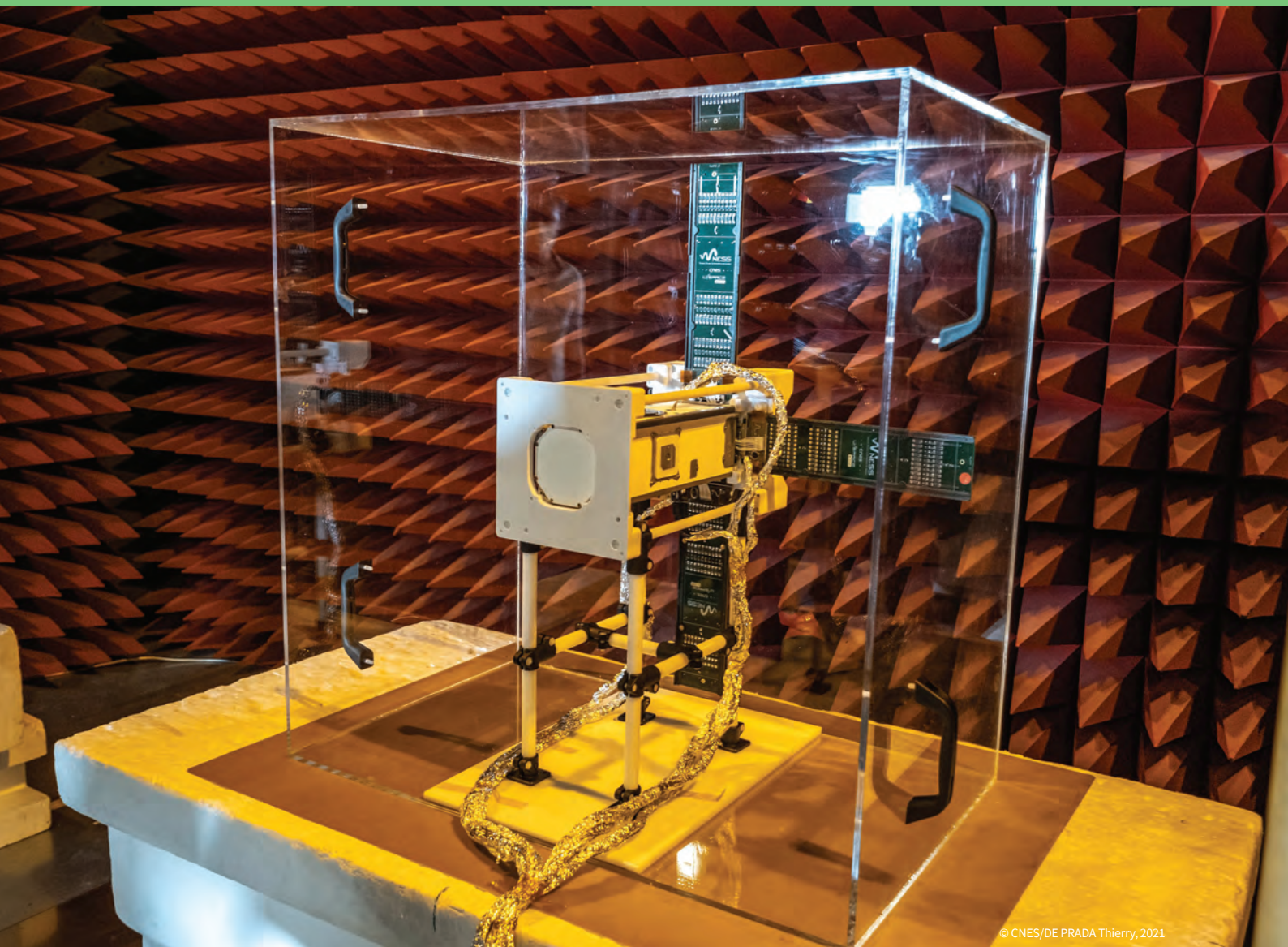
Travailler avec les acteurs et structures qui peuvent soutenir le financement et agir sur la programmation des recherches sur la thématique de la ville.

- MITI au CNRS
- Allenvi
- Le réseau France Ville Durable
- JPI Urban Europe
- Pôle de compétitivité Cap Digital et d'autres sur des thématiques plus spécifiques
- Certains ITE comme Efficacity
- Le C40, l'U20 le sommet des villes du G20
- Les *think tank* ou laboratoires prospectifs de certains grands groupes : Phosphore (Eiffage), Léonard (VINCI) etc.

# Défi 12

## Nanosatellites

**Conseil scientifique: Mathieu Barthélémy, Pierre Drossart, Laurent Dusseau, Martin Giard, Pierre Kern, Benoit Mosser**



© CNES/DE PRADA Thierry, 2021

Les perspectives du CNES et de l'INSU-domaine Astronomie/Astrophysique avaient, en novembre 2019, fait un bilan et émis des recommandations via des groupes de travail. Ces éléments ont été présentés et discutés lors de l'atelier. L'objectif de l'atelier était de présenter un bilan des acteurs et des activités en développement du domaine.

Il est très vite apparu lors de la préparation de l'atelier que l'étendue des recherches du domaine débordait le périmètre proprement dit de l'INSU. Le développement des nanosatellites fait émerger de nouveaux acteurs au départ extérieurs au spatial dans la discipline: un échange de savoir-faire entre laboratoires orientés sur des techniques nouvelles en voie de spatialisation, et les laboratoires déjà bien impliqués dans le développement d'instrumentation spatiale « classique » est un élément important d'efficacité pour la réalisation de nouveaux projets. Certains de ces laboratoires sont en dehors du domaine INSU, et ont donc été invités à l'atelier, étendant ainsi le domaine strictement thé-

matique de l'INSU (INSIS principalement), afin de garantir une bonne communication des acteurs du domaine au-delà des frontières institutionnelles.

Le centrage de l'atelier est bien sur la recherche, fondamentale ou appliquée, dans les thématiques INSU. De ce point de vue, un biais est apparu avec une sous-représentation du secteur Océan-Atmosphère (pourtant présent dans le domaine concerné). Ce biais doit être connu pour être corrigé dans les actions futures du domaine INSU. Des acteurs du domaine ont pu cependant faire en séance une synthèse des activités connues.

La liste des projets présentés à l'atelier n'est qu'un échantillon et n'a donc pas valeur de priorisation ni de sélection d'aucune sorte, mais offre un panorama, déjà très varié et large des activités du domaine d'interaction des thématiques INSU avec l'exploration par nanosatellites.

# 1. Les grands enjeux

Les recommandations des prospectives CNES et INSU/AA, préparées en coordination, ont été rappelées. On renverra ici simplement aux conclusions disponibles de ces travaux. Les recommandations proposées concernent le développement d'une filière nanosats scientifique, avec un contexte de développement de projet, d'analyse et tests spécifiques.

La grande diversité des projets AA, TS, OA et SIC présentés lors de l'atelier permet de tracer quelques grandes lignes de développement du secteur « nanosatellites » :

- Nanosatellites de démonstration technologique, avec objectifs scientifiques secondaires
- Nanosatellites à objectif scientifique prioritaire, en général ciblé sur un seul type de mesure
- Nanosatellites en réseau, développant un système de redondance fort ou de fonctionnement en système réparti (interférométrie, par exemple mais pas uniquement.)
- Nanosatellites à vocation pédagogique (nanosats étudiants)

## CENTRE SPATIAUX : IMPLICATIONS LABOS, ÉTABLISSEMENTS, ET UNIVERSITÉS

Les premiers projets développés sous l'égide du CNES l'ont été dans ce qu'il est convenu d'appeler les Centres spatiaux étudiants (programme JANUS). Dans le paysage des universités de recherche constituant le tissu des nouveaux centres spatiaux on distingue habituellement CSE (centres spatiaux d'établissement, dont la vocation de recherche est explicitement affichée), et CSU (centres spatiaux universitaires, à vocation prioritaire vers les implications d'étudiants dans la gestion des projets). Les CSU ont à l'origine fait partie du programme JANUS du CNES. Des présentations de la diversité de ces structures ont été faites dans l'atelier et sont disponibles sur le site de prospective INSU de cet atelier. Cependant, la distinction aujourd'hui entre les deux filières (pédagogique/scientifique) est amenée à s'estomper :

- Les développements sous gestion complète par des projets étudiants ont montré des limites dans les difficultés organisationnelles et de suivi interannuel : il est aujourd'hui observé qu'un projet, même à forte participation étudiante nécessite un pilotage fort (chef de projet/ingénieur système/scientifique responsable) et professionnel, d'où un pilotage par des laboratoires de recherche plutôt que des structures purement universitaires comme les UFR.
- Les nanosats « recherche » utilisent un volume parfois important de stages (masters en particulier) ou doctorants, et s'insèrent bien dans des projets recherche – formation de masters, écoles doctorales ou programmes gradués
- La nécessité d'une coordination nationale est apparue pour partager les compétences (et les erreurs commises

inévitables dans le développement de tels projets!), voir mutualiser lorsque c'est possible certains types d'activités. L'aspect « sélection de projet » avec expertise auprès des instances des tutelles décisionnaires n'est qu'un volet de la coordination, la partie de mise en commun des compétences et partage d'expérience étant ressortie des discussions comme primordiale.

Une coordination des centres spatiaux d'établissements (universitaires ou à vocation scientifique) est en cours sous la forme de la création d'une association.

## MOYENS DE TEST, PLATEFORMES D'INTÉGRATION ET TESTS

Les moyens de tests spécifiques aux plateformes nanosats se développent dans différents centres : les moyens d'intégration et tests classiques du spatial (pots vibrants, enceintes à vide thermique, etc.) sont bien entendu à considérer, cependant le concept du nanosatellites comme système spatial autonome conçu entièrement dans les laboratoires de recherche amène trois nouveautés :

- Tests de communication radioélectrique (segment sol), de la responsabilité des laboratoires développant ;
- Tests de pointage, de compatibilité électromagnétique, de géométrie, souvent pris en charge par les agences sur les satellites classiques ;
- Méthodes de management particulières mises en place sur la filière nanosats (méthodes AGILE par exemple).

## LOI SUR LES OPÉRATIONS SPATIALES

Un domaine nouveau pour les concepteurs de nanosats, qui est pris en charge par les agences nationales dans les systèmes satellitaires classiques est celui de la responsabilité civile des opérations, tests, fin de vie des nanosatellites. Une modification de la loi existante est en préparation : il est important que les acteurs ou futurs opérateurs de nanosatellites soient informés des contraintes juridiques associées, afin que les systèmes intègrent ces règles dès les premières étapes de développement, ainsi que la nécessaire information des tutelles concernées. Cette prise en compte est une nécessité juridique et donc une contrainte à intégrer dans tout développement de système de nanosatellites.

## COLLABORATIONS INTERNATIONALES

Même si le nanosatellite est développé par des équipes par définition de taille moyenne sans la lourdeur des consortiums internationaux de règle sur les grands systèmes, l'intérêt pour des collaborations internationales a été souligné :

- Nouveaux acteurs européens, parfois négligés des

grandes agences (pays « émergents » dans le domaine spatial en quête de visibilité par des projets gérés de manière autonome : l'exemple de l'Estonie a été évoqué)

- Partage de compétences entre laboratoires universitaires européens

Comme pour les systèmes spatiaux actuels, il va de soi que ces collaborations doivent se faire avec un cadre contractuel bien défini, respectant la propriété intellectuelle.

## VISIONS À LONG TERME

Il est trop tôt aujourd'hui pour connaître le développement futur des systèmes de nanosatellites, développés par l'industrie d'une part (télécoms, télédétection), par les agences spatiales ou des universités d'autre part (ESA, NASA et nombreuses universités américaines en particulier). Il est certain que la NASA parie sur la filière de nanosatellites « d'appoint » qui associés à une mission spatiale majeure, permettent d'ajouter un élément avec un risque plus élevé, mais qui ne fragilise pas la mission principale : c'est un atout pour le développement de nouvelles idées qui ne seraient jamais sélectionnées d'emblée sur des plus gros satellites. Ainsi les appels d'offres NASA/Discovery et New Frontiers associent un ou plusieurs nanosats associés. L'ESA a également des projets similaires. Sur le plus long terme, des propositions de réseaux de nanosatellites ont vu le jour (dans le cadre du programme ESA d'horizon 2050) : l'interférométrie radio, voire optique, mise en œuvre sur des systèmes de type nanosatellites permettrait des avancées énormes dans différents domaines. Un soutien aux équipes proposant dans le cadre européen « Horizon Europe » devrait être institué pour faciliter ces projets.

## RELATIONS AVEC LES AUTRES DÉFIS INSU

Les relations avec les défis en particulier sur production/exploitation de données ou instrumentation en milieu extrême ont été abordées. Sur ce dernier point, les spécificités du spatial, milieu extrême s'il en est, ne sont pas si proches cependant des instrumentations développées en science de la Terre ou océanographie – même si des échanges en technologie de capteurs peuvent être intéressants, les méthodologies de tests spatiaux, de mise en œuvre et transmission de données sont très différentes. Ces points, qui n'ont pu être abordés qu'à la marge dans cet atelier, devront être rediscutés lors du séminaire de synthèse de l'INSU avec les différents coordinateurs.

## DISCUSSION GÉNÉRALE

Les propositions émises lors des prospectives CNES et INSU/AA évoquées plus haut et disponibles dans les documents fournissent un cadre de mise en place d'une filière qu'il n'est pas utile de reconstruire autrement ici. Sur ce dernier point, l'atelier a rappelé les actions de coordination en cours menées grâce au CSUM sous l'impulsion de Laurent Dusseau avec le CSUG (Mathieu Barthélémy) pour la mise en place d'un réseau des CSU/CSE dont le séminaire fondateur, soutenu par les tutelles des différents centres spatiaux français, aura lieu dès que les conditions le permettront.

Un point de politique générale a été largement discuté dans l'atelier, c'est celui de la nécessaire coordination nationale des différents acteurs, sur une filière scientifique de nanosatellites, tout en respectant l'autonomie des acteurs universitaires qui les développent. Cette coordination pourrait légitimement être prise par le CNRS, qui a à la fois l'étendue thématique interdisciplinaire et la dimension nationale, le soutien du CNES en matière de développement technologique devant être étendu, au-delà de la seule filière de nanosats universitaire. Il y a donc des enjeux scientifiques où la communauté est demandeuse d'un cadre structurant qui permette de compléter les moyens des politiques locales universitaires.

Un autre point largement discuté dans l'atelier et qui complète les recommandations des prospectives précédentes concerne l'expertise indépendante et rigoureuse des projets afin de leur assurer une visibilité objectivement reconnue qui peut être proposée aux tutelles responsables des développements de ces projets. Le programme JANUS ne saurait (et ne le prétend d'ailleurs pas) constituer le cadre de sélection, la vocation « recherche » des nanosatellites nécessitant la mise en place de comités scientifiques dont les experts sont dans les laboratoires de recherche, au niveau international. Un cadre d'expertise proposée au niveau national pourrait permettre d'une part aux établissements porteurs de vérifier l'excellence scientifique des projets qu'ils souhaitent porter, d'autre part de postuler à des appels d'offres nationaux ou internationaux avec une meilleure visibilité. Cependant, la constitution d'un tel comité nécessite l'implication d'une agence d'évaluation nationale, qui pourrait impliquer les organismes de recherche et le CNES.

## 2. Recommandations

L'atelier a pris connaissance des synthèses effectuées lors de la prospective CNES et de l'INSU/AA en 2019 et les rappelle ci-dessous :

- Investir dans la filière nanosatellites pour la science ;
- Repenser et renforcer la notion de démonstration et gérer les projets de manière agile ;
- Mener un plan de développement et d'évaluation des technologies ;
- Développer des méthodes et outils d'analyse système ;
- Définir des modalités de déploiement incrémental des systèmes répartis complexes ;
- Favoriser la structuration nationale des actions scientifiques des CSU et CSE.

De plus, la situation actuelle des campus spatiaux universitaires et d'établissement (CSU/CSE) a mis en évidence un fort besoin d'une coordination nationale pour harmoniser les efforts sur deux plans :

- Sur les moyens de tests, en relation avec les structures en cours de création sur les moyens de tests spatiaux « classiques » (PARADISE) ;
- Sur les projets : une information générale sur les projets et leur avancement présente un grand intérêt pour augmenter les synergies et les échanges sur les techniques.

L'INSU pourrait avoir ce rôle de coordination nationale pour le CNRS, et en coordination avec le CNES, en ayant grâce au réseau national des OSU en particulier un moyen de levier important en matière d'expertise et de connaissance des moyens :

- Sur les financements, une implication multiforme apparaît la mieux adaptée aux enjeux à la fois scientifiques et politiques : établissements (Comue/IDEX), région, national (CNES, INSU, ANR...), Europe ;
- La mise en place de Comité d'experts pour participer à la sélection de projets ou d'une liste d'experts nationaux consultables dans ce but ;
- Une coordination internationale doit être envisagée, avec les acteurs du spatial européen (ESA, UE), et les réseaux européens d'universités impliquées dans le domaine, afin de diversifier les acteurs et bénéficier de compétences multiples.

# Défi 13

De la production  
de données à  
leur exploitation  
scientifique

**Conseil scientifique : François André, Christophe Baehr, Baptiste Cecconi, Odile Cœur- Joly, Jean-Marc Delouis, Etienne Gondet, Dino Ienco, Maud Langlois, Jean-Philippe Mallet, Roland Martin, Marie-Pierre Moine, Nemesio Rodriguez-Fernandez, Mike Toplis, Charlotte Vastel, Johan Villeneuve**



Cyril FRESILLON / IDRIS / CNRS Photothèque

Le chemin partant des données brutes aux données réduites et calibrées pose de multiples problèmes tant au niveau de l'algorithmique que de l'infrastructure de calculs. Il en est de même pour les données spatiales ou les simulations numériques basées sur des modèles théoriques. Ceci inclut aussi l'émergence de nouveaux types de données: *multi-messenger* (ondes gravitationnelles, par exemple), astrophysique/astrochimie de laboratoire, génétique environnementale...

En terme d'exploitation scientifique, compte tenu du volume et la variété des données disponibles, le recours à des solutions automatisées, voire « industrielles », qu'elles soient statistiques avancées ou bien relèvent du *big data* ou de l'intelligence artificielle, est à l'ordre du jour dans l'ensemble des disciplines de l'INSU.

# 1. État de l'art et enjeux

## NOUVELLES MÉTHODES DE TRAITEMENT, CLASSIFICATION ET GESTION : RÔLE DE L'IA, BIG DATA...

Aujourd'hui une multitude de capteurs collectent de plus en plus d'informations dans tous les secteurs des sciences de l'Univers. Leur volume, la fréquence d'acquisition et la complexité de données acquises (*Big data*) ouvrent des nouveaux défis à la communauté de l'INSU en terme de méthode d'analyse et traitement. C'est pour cela que des nouvelles techniques sont, aujourd'hui, nécessaires pour exploiter au mieux toute l'information collectée et pour extraire des connaissances nouvelles grâce à la complémentarité des informations multi-support.

Pendant les réflexions menés par la tâche 1 « Nouvelles méthodes de traitement, classification et gestion : rôle de l'IA, *big data*... » nous avons explicitement abordé les points liés aux nouveaux paradigmes d'analyse en choisissant des applications parmi tous les domaines de l'INSU : de la Terre Interne à l'astrophysique en passant par l'océan, les surfaces continentales et l'atmosphère.

Dans un premier temps, il nous est apparu fondamental de déterminer la « complexité » des données à analyser ainsi que leurs caractéristiques principales. Par exemple, aussi bien dans le domaine de l'astrophysique que de l'observation de la Terre nous devons gérer des données incomplète et/ou affectées par des valeurs manquantes, comme dans le cas de données d'observation de la Terre, où la présence de nuages peut bruyé les données collectées par des capteurs optiques. Dans certaines applications, les données montrent d'autres caractéristiques comme la forte dimension temporelle (séries temporelles d'images satellitaires), ou des informations multi-échelle spatiale. Il est parfois possible de s'appuyer sur la complémentarité entre différents capteurs, ainsi que d'utiliser des approches multi-source (observations, modèles, mesures de terrain,) pour extraire des synergies entre les différents types de données en obtenant une vraie valeur ajoutée. Par exemple, des réseaux de neurones permettent de faire des meilleures estimations de l'humidité du sol depuis l'espace quand on utilise en entrée des données de capteurs en micro-ondes actives et passives à différentes fréquences ainsi que des réflectances dans le visible et infrarouge et la température du sol issue des modèles météorologiques alors qu'il n'y a ce jour aucun modèle physique qui puisse intégrer simultanément tous ces types d'observations.

Ensuite, selon le type d'analyse, différentes approches et outils pourront être mobilisés. L'analyse nécessite néanmoins des compétences spécialisées de plus en plus com-

plexes qui aujourd'hui ne sont pas présentes dans le simple cadre de l'INSU. Des fortes interactions entre communautés sont nécessaires, notamment l'expertise amenée en science des données et traitement du signal qui sont principalement issus de l'Institut INS2i du CNRS ou d'autres organismes comme Inria.

Parmi les techniques et les approches qui sont en train d'émerger, les approches à base d'intelligence artificielle (ou plus en particulier à base d'apprentissage automatique ou *Machine Learning*) s'appuient aussi bien dans différents domaines du traitement du signal que dans les domaines d'intérêt de la communauté INSU. Ces approches semblent bien adaptées pour gérer et tirer parti des dimensions spatiales et temporelles qui caractérisent les données en sciences de l'Univers lorsque de gros volumes de données sont disponibles pour les calibrer/entraîner. Néanmoins l'efficacité de ces modèles, de même que les questions inhérentes à la compréhension de ces approches, sont à l'heure actuelle fortement débattues. La question de « l'explicabilité » (comprendre comment une décision a été prise par un modèle d'apprentissage statistique) est un point très important surtout dans une communauté, comme celle de l'INSU, où au-delà de la qualité des résultats, un des objectifs de la chaîne de traitement doit être aussi une meilleure compréhension des phénomènes sous-jacents.

Au-delà des opportunités représentées par les approches à base d'IA pour supporter et améliorer une partie considérable des analyses de la communauté de l'INSU, il est clairement ressorti pendant les discussions que ces outils ne sont pas suffisants. L'expertise humaine et l'ensemble de connaissances que la communauté a acquis et formalisé pendant son travail avec des approches classiques (modélisation physique,) doit être aussi intégrée dans les nouvelles méthodes de traitement de données. Ce point n'est pas spécifique aux applications INSU mais interroge aussi la communauté internationale en science de données : comment intégrer des connaissances acquises avec des approches traditionnelles (modèles physiques) dans les processus d'apprentissage automatique pour avancer vers une « IA hybride ». À l'inverse, des méthodes d'apprentissage automatique entraînées dans un pur contexte *data-driven* peuvent être utilisés pour remplacer ou compléter certains modules des modèles physiques dans lesquels la connaissance sur certains processus ne permet pas une modélisation physique précise. Par exemple pour l'assimilation de données dans les modèles météorologiques.

L'apprentissage statistique n'est pas nouveau, datant d'environ 40 ans. Dans certains domaines de l'INSU comme par exemple en observation de la Terre, c'est un outil courant.

L'apprentissage profond, dont beaucoup de développements récents proviennent des problématiques de traitement d'images, n'est pas forcément adapté à toutes les applications dans la sphère de l'INSU. Il faut rester vigilant pour s'assurer que les méthodes soient adaptées aux problèmes à résoudre et éviter que les méthodes ne prennent le dessus par rapport aux applications par un effet de mode. Bien évidemment, tout n'est pas *big data* et intelligence artificielle, par exemple les théories des systèmes dynamiques et du chaos peuvent permettre de remonter aux équations qui gouvernent un système à partir de séries temporelles relativement courtes, loin du paradigme du *big data*.

Les meilleurs résultats seront obtenus en s'assurant que différentes communautés travaillent ensemble en créant un vivier de profils mixtes avec une double compétence dans la science des données et dans l'application thématique. Ainsi, des initiatives dans certaines écoles doctorales « thématiques » d'encourager les étudiants à intégrer une partie des crédits de formation en science de données sont à développer. Par ailleurs cette expertise peut être très utile à ceux qui ne continueront pas dans la recherche académique pour intégrer le monde socio-économique et industriel par la suite.

### CHAÎNE DE CONTRÔLE (INTÉGRITÉ, QUALITÉ, VÉRACITÉ) DES DONNÉES

La chaîne de contrôle des données recouvre un ensemble de procédures et d'informations permettant de tracer l'origine et de garantir la transparence d'une donnée. Selon les domaines de recherche, cette dernière peut être de nature variable: échantillon physique (roche, minéraux, sol, aérosol, glace, liquide, gaz...), donnée analogique issue d'un capteur, ou encore donnée issue d'une modélisation numérique. Les discussions au cours de cet atelier ont révélé l'existence de grandes disparités entre les communautés aussi bien en termes d'attendus d'une chaîne de contrôle des données au regard des objectifs/besoins scientifiques, que de besoins techniques et humains, ou de procédures de contrôles des données déjà mises en œuvres. Ainsi, selon les besoins et objectifs scientifiques des différentes communautés le contrôle des données va d'une gestion « artisanale » mais fonctionnelle à l'échelle d'un capteur/d'une collection au sein d'un laboratoire de recherche, jusqu'à une gestion harmonisée et structurée à l'échelle d'un ou d'une IR/TGIR/SNO/Institut, voire internationale.

Énoncer les défis à relever afin d'élaborer ou d'optimiser une chaîne de contrôle des données revient à se poser des questionnements d'ordre sémantique, systémique, méthodologique et logistique:

- Dans un contexte propre à chaque domaine de recherche

ou communauté scientifique, quelle est la nature des données, et en fonction de cela, que signifie concrètement une chaîne de contrôle de ces données? C'est-à-dire, quelles informations et procédures doivent permettre de garantir l'intégrité, la qualité et la véracité d'une donnée, ainsi que sa réutilisabilité?

- Quels sont les objectifs d'une chaîne de contrôle des données en fonction des besoins et des objectifs scientifiques au sein d'une communauté? En d'autres termes, pourquoi mettre en place une telle procédure, quel intérêt collectif y a-t-il à le faire, quel contour et contenu faut-il lui donner, quelle est l'importance de telle ou telle donnée (rapports entre le coût et l'intérêt de la sauvegarde d'une part et le coût et la possibilité de refaire la donnée d'autre part)?
- Comment mettre en place une chaîne de contrôle des données et à quels niveaux d'infrastructures et de centralisation la mise en œuvre doit-elle être organisée (laboratoire/réseaux/IR/institut/inter-institut/...)? Comment est-il possible de concilier un besoin d'harmonisation des procédures et des pratiques avec les contraintes propres à chaque communauté (grande hétérogénéité des capteurs et des données, interdépendance entre données de nature différente - chaîne de suivi, de l'échantillon jusqu'à la donnée publiée par exemple -, gestion des grands volumes de données)?
- Quels moyens techniques, humains et financiers faut-il déployer afin de permettre la mise en place de procédures de suivi, de contrôle, de préservation et de réutilisabilité des données et des échantillons au sein des différentes communautés scientifiques?

### LE DÉFI DES VOLUMES DE DONNÉES À TRAITER SUR DES TEMPS COURTS ET DIVERSITÉ DES DONNÉES

Ces dernières années le volume de donnée a explosé et la capacité à traiter ce flux d'information est devenu un enjeu clef de la recherche. L'organisation qui parvient à maîtriser ces aspects prend un avantage concurrentiel sans précédent. De nombreuses avancées scientifiques résultent de la capacité à extraire efficacement, de volumes de données de plus en plus grands, l'information pertinente.

Ce contexte est partagé par de nombreux domaines de l'INSU aussi bien dans l'observation de la Terre qu'en astronomie. Certains chiffres donnent le vertige (e.g. Sentinel 1 et 2: 12TB/jour, LSST: 20 TB/jour; SKA: 90 TB/s).

Afin d'appréhender les aspects les plus saillants de cette problématique, nous avons souhaité traiter 3 questions:

- Infrastructures de traitement de données: Est-il possible de construire une infrastructure adaptée pour répondre

aux contraintes des traitements de données massives ? Des démarches de ce type existent déjà. Par exemple, l'approche Data Terra essaie de fédérer un ensemble de données garantissant une interopérabilité et une disponibilité nécessaire à la fouille de données. Il existe aussi des infrastructures non académiques, en particulier sur l'observation de la Terre, qui proposent des services de mise à disposition de données.

- La conservation des données: Comment sélectionner les données à conserver et pendant combien de temps ? La quantité de donnée produite par les observations et les modélisations augmente exponentiellement. Il n'est pas possible de tout archiver. Même s'il est maintenant acté qu'il faille définir un plan de gestion de données en amont de tout projet scientifique, l'enjeu de l'archivage à moyen et long terme reste fort.
- Comment recentrer la plus-value des laboratoires dans le développement des chaînes des traitements ? Les chaînes de traitement de données sont de plus en plus complexes et demandent de plus en plus de développement logiciel. La tendance globale, et pas seulement dans le domaine scientifique, est de faire porter aux traitements de données la résolution de la complexité. Ceci est accéléré par les progrès rapides de l'intelligence artificielle. Comme exemple, le projet SKA est par nature un problème de gestion de données plus qu'un problème instrumental. Les équipes du CNRS ne sont pas dimensionnées pour prendre en charge l'ensemble de ces développements et il faut donc faire un choix entre la sous-traitance et les parties clés qui restent liées à nos recherches. De plus, il n'y a pas que la recherche scientifique qui rentre dans cette logique. L'industrie est aussi confrontée à cette révolution qui augmente rapidement la part du « soft » (e.g. voiture autonome) dans leurs activités de développement. Ce qui provoque une concurrence de fait sur les ressources humaines. Comment attirer de jeunes talents dont nous avons besoin dans nos instituts ?

## PRODUCTION ET TRAITEMENT DES DONNÉES À BORD

Cette thématique se concentre sur les données produites et traitées à bord des satellites, nanosatellites, drones volants, drones marins, ballons et avions de l'INSU. Le contexte de l'embarqué, où les ressources sont limitées à bord, impose des contraintes supplémentaires sur les développements afin de garantir les performances scientifiques des instruments. Le volume et le stockage des données, la puissance de calcul, les débits de transfert, l'éloignement des capteurs, et l'énergie disponibles à bord deviennent des problématiques majeures par rapport à des développements classiques.

Dans sa réflexion, le groupe de travail a retenu 3 grands enjeux pour l'avenir liés à ce contexte, avec de nombreux défis à relever, qui ont été discutés lors des tables rondes de l'atelier.

- Le traitement et la production de données
  - Comment réduire le volume des données à transmettre ?

Faut-il sélectionner les données à bord ?

- Faisabilité pour de l'IA embarquée ? Quels algorithmes ?
- Comment introduire du Machine Learning à bord pour adapter en temps réel les trajectoires des drones, les mesures ?
- En quoi le vol en flottille (balises, nano satellites...) induit de nouveaux traitements ?
- Comment transférer les données bord entre pays en temps réel ? Exemple des avions : accords internationaux entre fournisseurs d'accès ? Wifi ?
- La fiabilité et la qualité
  - Faut-il accepter une moins grande tolérance aux pannes et avoir plus de performance ?
  - Reprogrammation fiable des algorithmes à bord ?
  - Fiabilité, qualification des algorithmes et des données ?
  - Comment passer d'une description théorique d'algorithmes à une implémentation robuste et qualifiée pour une cible matérielle embarquée donnée ?
  - Comment gérer les erreurs survenues à bord d'un essai de nanosatellites ou drones ?
- L'organisation des développements
  - Quelle est la valeur ajoutée des labos dans les développements des traitements bord ?
  - Quelles activités peuvent être sous-traitées à l'industrie ? pour quel coût et quel impact sur l'organisation des projets ?
  - Émergence de nouveaux acteurs, startups, CSU, industriels, grand public : comment s'y associer ?
  - Généricité des solutions : algorithmes simplifiés ? Calculateurs génériques ? Développements communs ?

## LOGISTIQUE DES DONNÉES, WORKFLOW, DATA MANAGEMENT PLAN

Loin d'être statiques, les données circulent au sein des systèmes d'informations tout au long de leur période d'utilité. Ces flux sont souvent inter-systèmes : logistique des données d'un capteur vers un centre de données, agrégation de données multi-sources afin de générer un produit, distribution de jeux de données, déplacement vers ou à partir d'un entrepôt de données ou d'un centre d'archivage. Les flux de données peuvent également se produire de manière interne à un système, on peut par exemple penser aux différents niveaux d'un jeu de données.

La volumétrie, la diversité des données et la vitesse des flux imposent désormais une gestion plus rationalisée par rapport aux pratiques actuelles, et prenant en compte l'ensemble des chaînes de production et d'utilisation de la donnée. Ainsi, toute une logistique des données ayant pour but la gestion du placement, du stockage non persistant (cache/buffer), des formats et modèles des données en fonction de leurs utilisateurs et des ressources auxquelles ils ont accès ; l'archivage des données et des produits ; ainsi que de leurs métadonnées et informations de provenance doit être mise en place tout au long des chaînes de traitement et d'utilisation des données. Elle aura notamment pour but de prévoir les caractéristiques des flux et ainsi anticiper la mise en place et/ou l'accès à des infrastructures physiques (stockage, calcul, réseau...) et des services distribués néces-

saires (calcul, analyse, accès, distribution, archivage... ) à déployer et à supporter sur ces infrastructures. Le positionnement des données devra viser à limiter leur déplacement (réutilisation sur des périodes de temps associées à l'utilisation de ces données), lorsque les volumes et/ou la diversité des données impliquées le rendent inefficace (débit réseau insuffisant) voire impossible (politique et capacité de stockage). Lorsque les volumes de données dépassent le cap du pétaoctet (Po), l'infrastructure devra permettre le travail sur les données en optimisant leur déplacement.

Cette problématique autour la logistique des données est également explorée dans différents domaines comme la physique des particules, l'observation spatiale, la biologie, et l'IoT (*Internet of Things*). En particulier, la logistique pour des données produites dans des environnements centralisés (les grands instruments) ou des environnements périphériques (satellites, capteurs distribués) constitue un défi. Ces communautés ont développé un continuum d'infrastructures (*High Performance Computing, Cloud, Edge computing*) et de services aujourd'hui opérationnels. Au niveau européen, les projets H2020 financés dans le cadre d'EOSC (European Open Science Cloud) reprennent ces concepts avec pour but les étendre et de les adapter à d'autres thématiques. Les grandes infrastructures ou projets d'infrastructure de l'INSU conçoivent et implémentent déjà ce type d'infrastructure (l'IR Data Terra, le Square Kilometer Array et ses éclairateurs, etc.). Tous les domaines scientifiques du CNRS prévoient une évolution des données produites qui dépassera le cap des 10 Po dans les prochaines années, hors grands projets. Il est donc fondamental de préparer l'avenir avec des plateformes logicielles de services distribués et un continuum d'infrastructures adaptés pour le stockage, le calcul, l'analyse la distribution et l'archive de ces données.

Les modalités locales de gestion des données (e.g. expérience, grand instrument, service d'observation, projet ou entité) doivent être définies avec un plan de gestion de données (Data Management Plan, DMP, voir section suivante), des services de données FAIR (Facile à trouver, Accessible, Interopérable et Réutilisable), mais doivent aussi se reposer sur des plateformes de services et un continuum d'infrastructures coordonnée à l'échelle nationale. Aujourd'hui, il devient urgent de proposer à la communauté une plateforme de services de données et de calcul et un continuum d'infrastructures orientées données, qui doivent s'appuyer sur des infrastructures nationales de calcul (GENCI, méso-centres) et de données (centres de données nationaux et régionaux), de communication (RENATER) et en faire évoluer les modèles. Une telle stratégie doit permettre de déplacer efficacement (au moins une fois) les données, les placer dans le temps (cache/buffer) là où on pourra dispo-

ser des ressources nécessaires (capacité et fonctionnalité) pour leur traitement et leur analyse, les traiter, archiver ces données et leurs produits dérivés pour leur réutilisation. Si le principe des données ouvertes doit primer, un système de services FAIR pour des données distribuées et multi-sources doit permettre d'honorer les droits d'accès à ces données (au moins pendant leur phase de production ou d'éventuel embargo).

La structuration actuelle du paysage devrait permettre de proposer une architecture distribuée de calcul et de gestion de la donnée, en s'appuyant sur les ressources existantes à différents niveaux (e.g. méso-centres de calcul régionaux, grands centres calculs nationaux) mais nécessite une évolution du modèle et de la gestion de ces ressources. Différents niveaux d'abstraction des modèles de données et de stockage (objet, PFS, stockage froid), des logiciels de gestion de données distribuées (e.g., irods ou rucio) et des services d'authentification et d'autorisations (Authorization and Authentication Infrastructure, AAI) sont développés et utilisés en production et à grande échelle par les projets ou infrastructures qui participent à l'élaboration de l'EOSC, en particulier par EGI (European Grid Infrastructure) et EUDAT (European Collaborative Data Infrastructure).

La question du financement et du modèle économique de ces infrastructures de données distribuées est cruciale. S'il est important de s'appuyer sur l'existant (calcul, stockage, réseau), l'accroissement des besoins doit pouvoir être financé à la fois en mode projet (investissement) mais surtout de manière pérenne. Aujourd'hui, nous n'avons pas identifié de mécanisme de financement qui permet de pérenniser de manière durable un investissement effectué dans la cadre d'un projet. S'appuyer sur les grandes infrastructures nationales est un impératif, leur donner les moyens pérennes d'accueillir les données des différentes disciplines de l'INSU est un défi.

### **DATA MANAGEMENT PLAN (DMP) ET MACHINE ACTIONNABLE DATA MANAGEMENT PLAN (MADMP)**

Dès sa conception, tout projet d'acquisition ou de production de données, doit aborder les questions du cycle de vie de ces données: quelles seront les volumes produits, quels seront les volumes transférés, quelles données seront détruites et à quelle échéance. . . Le DMP regroupe ces questions de manière exhaustive. Il permet d'identifier les acteurs, les coûts et les échéances. Il permet également de mesurer la maturité d'un producteur de données vis à vis de celles-ci. Ainsi, il est un outil incontournable des projets de données et est à ce titre exigé par un grand nombre de financeurs (projets H2020, ANR, DataTerra... ).

Or, force est de constater que l'utilité des DMP n'est actuellement que peu comprise par les différentes parties prenantes. D'une part, arrivant en amont il est vu comme un énième document administratif à produire. De plus, arrivant à un moment du projet où l'équipe est focalisée sur la production des données, les questions qu'adresse le DMP semblent souvent trop anticipées, d'autant que les métiers en charge des aspects aval des données – informaticiens, documentalistes, juristes – sont alors peu représentés. Enfin son caractère statique fait qu'il est rarement mis à jour après sa rédaction initiale.

Devant ce constat, plusieurs organismes internationaux ont défini les bases d'une version dynamique du DMP, la maDMP. Un tel DMP, formalisé, connecté aux différents référentiels de la donnée (entrepôts, thésaurus...) va être à la fois opéré par des humains et des machines. Il permettra ainsi la mise en place de nouveaux services. Ainsi, par exemple, pour le financeur, il permettrait une estimation du coût de la conservation des données, pour le gestionnaire de données, il favoriserait l'anticipation des besoins en stockage, pour le chercheur, il apporterait une meilleure distribution de ces données...

La mise en place des maDMP ne sera pas immédiate et s'inscrit sur le moyen terme. D'ici là les DMP sous forme traditionnelle restent prépondérants.

## WORKFLOWS

Au sein d'un observatoire, d'un centre de données ou d'un centre de calcul, la donnée va être transformée, agrégée, déplacée de manière systématique via les chaînes de traitement. Ces chaînes peuvent être de natures différentes: workflow de d'intégration, production, d'analyse, de diffusion, de curation...

Si les workflow d'intégration sont ont été largement adoptés dans le développement des projets logiciels (grâce aux fonctionnalité d'intégration continue proposées par les outils de génie logiciel, comme Gitlab, Jenkins ou Github),

plusieurs faiblesses peuvent apparaître dans workflows actuels. Par exemple, leur construction généralement incrémentale et hétérogène rend difficile leur maintien en conditions opérationnelles ou leur évolution. De plus ne reposant pas forcément sur des outils dédiés à ce genre de traitement ils répondent difficilement aux nouvelles attentes du domaine.

Parmi elles, citons principalement :

- Fonctionnalités structurelles: évolution (pouvoir être étendu ou modifié), sécurité (ne pas porter atteinte à l'environnement d'exécution), surveillance (pouvoir surveiller l'exécution par un être humain ou un système automatique), résilience (permettre facilement la définition des comportements en cas d'erreur), paramétrisation (permettre l'injection de paramètres lors de l'exécution);
- Fonctionnalités dynamiques: passage à l'échelle (pouvoir s'adapter dynamiquement à un redimensionnement des ressources sur lesquelles il s'exécute), transport (pouvoir être déplacé d'un centre de données à un autre), exécution multi-environnementale (pouvoir s'exécuter sur des environnements différents: poste de travail, HPC, Cloud);
- Fonctionnalités collaboratives: gestion des versions (être intégré aux forges logicielles), mutualisation (certaines parties de workflows peuvent être mises en commun), reproductibilité (une exécution doit pouvoir reproduire un résultat).

Parmi les différentes solutions technologiques qui apportent nativement certaines de ces fonctionnalités il convient de choisir lesquelles vont être les plus adaptées au différents cas de figure. Par exemple un outil comme Apache Airflow va convenir parfaitement aux filières d'acquisition *in situ*. En revanche, pour la mise en place rapide de workflows d'analyse mutualisables et reproductibles, on utilisera plutôt des outils comme Galaxy.

L'éventail des besoins et des outils disponibles souligne donc un besoin de formation et d'information des équipes de recherche, du chercheur aux équipes informatiques.

## 2. Recommandations

Malgré une grande hétérogénéité, aussi bien des données, des projets ou des communautés impliquées, il y a des défis communs comme l'accroissement des volumes à stocker et à gérer, les échanges de données et la limitation des ressources (dans tous les sens du terme). Des initiatives pour aborder ces problématiques (standards, organisations) existent, et il faut s'en appuyer. Il est fondamental d'avoir une plateforme permettant d'échanger et de communiquer au sein de l'INSU et hors de l'INSU.

En analysant l'état de l'art, les défis et les recommandations pour chaque thématique de cet atelier, quelques recommandations majeures se dégagent :

- **Gouvernance nationale des données.** La mise en place d'une Infrastructure de Recherche (IR) Données est recommandée. Cette IR devrait avoir plusieurs missions : (i) Interconnexion des entrepôts physiques de données, (ii) Rapprochement avec les centres de calculs, (iii) Mise en place d'outils communs, (iv) Expertise vis à vis des communautés scientifiques et des entrepôts de données
- **Gouvernance locale des données.** Il est recommandé d'imposer sur l'ensemble des projets des DMP faisant figurer au minimum : (i) La durée de conservation des différents produits, (ii) Les volumes produits, (iii) Les coûts de conservation annuels et (iv) Les entrepôts de données concernés.
- **Financement pérenne.** Il est recommandé de proposer et de mettre en place un modèle économique stable pour la mise en place, l'utilisation et la pérennisation des infrastructures de données.
- **Besoins de profils mixtes.** Il faut favoriser la formation, le recrutement et la valorisation des profils hybrides : (i) *Data scientists*: *Data science* + Thématique scientifique, (ii) *Data managers*: Gestion de la donnée + Thématique scientifique et (iii) Spécialistes infrastructure: Calcul + stockage. Une révision des fiches métier des ingénieurs BAP E ainsi que la création d'une section interdisciplinaire INSU avec l'INSIS et/ou l'INS2I pourrait être une voie pour le recrutement de chercheurs à double profil.
- **Besoins en communication.** Il faut s'ouvrir et communiquer d'avantage à plusieurs niveaux : en interne à l'INSU, vers les communautés isolées, au sein de réseaux métiers, de viviers de compétences, écoles doctorales, autres instituts (INS2I, INSMI, INSIS). Mais également vers des partenaires industriels, et vers la science ouverte et participative. Par exemple, il serait souhaitable d'encourager la communauté INSU à proposer des challenges ouverts autour des données en sciences de l'Univers.

Ci-dessous sont listées les recommandations plus spécifiques à chacune des thématiques discutées lors de l'atelier.

Nouvelles méthodes de traitement, classification et gestion : rôle de l'IA, *big data*...

- Communication entre communautés : encourager l'organisation d'ateliers sur les thématiques INSU au sein des Groupements de Recherche Madics et ISIS. S'appuyer sur les instituts récemment créés dans le cadre du plan « Villani » 3IA, dont certaines chaires ont une composante ou application dans les domaines de l'INSU. Des initiatives comme ENV'IA à Toulouse, pour favoriser le rapprochement des communautés « cœur de l'IA » et « sciences de l'Univers » sont des exemples à suivre qui pourraient faire l'objet d'appels d'offre INSU. Il faut également encourager les chercheurs spécialistes d'une thématique à définir des Data Challenges qui puissent attirer les spécialistes de la science de données.
- Formation de profils mixtes. Comme mentionné ci-dessus, la formation de profils mixtes thématique/science des données apparaît comme nécessaire. Ces personnes à double compétence pourront par ailleurs favoriser les échanges entre la communauté INSU et celles d'autres instituts comme l'INS2i ou l'INSMI et autres organismes comme Inria. Les initiatives de certaines écoles doctorales (à Strasbourg, par exemple), dont un tiers des crédits doit s'obtenir en science de données sont à encourager. Des écoles thématiques de data science comme « Data Science for Geosciences » sont un autre bon exemple d'actions à encourager et à généraliser pour l'ensemble des disciplines de l'INSU.
- Recrutement de profils mixtes. Bien évidemment, en plus de favoriser la montée en compétences du personnel INSU en sciences de données, il paraît nécessaire d'assurer le recrutement de nouveaux agents avec profils mixtes. Le *Data scientist* étant à la frontière entre poste de chercheur et ingénieur de recherche, la reconnaissance des profils mixtes doit passer par des stratégies de recrutement ciblées. Un exemple pourrait être la création d'une commission interdisciplinaire pilotée par l'INSU, comme c'est le cas de la CID-52 pilotée par l'INEE.
- Accès aux données et aux moyens de calcul : des plateformes de données comme l'observatoire Virtuel ou l'Infrastructure de Recherche Data Terra, par exemple, doivent permettre aux *data scientists* (chercheurs ou ingénieurs) le pré-traitement des données de façon efficace pour pouvoir se concentrer sur la recherche d'algorithmes innovantes en utilisant des synergies entre différents jeux de données et obtenir une vraie valeur ajoutée par rapport à des approches « classiques ».

## CHAÎNE DE CONTRÔLE (INTÉGRITÉ, QUALITÉ, VÉRACITÉ) DES DONNÉES

La définition des contours et des contenus des chaînes de contrôle des données doit être le fruit d'un travail de réflexion au sein des différentes communautés scientifiques. C'est en effet à ce niveau seulement que peuvent être identifiés les spécificités et les besoins propres à chaque communauté en adéquation avec ses objectifs et ses besoins scientifiques, pour ainsi déboucher sur un travail qualitatif d'harmonisation et de standardisation des procédures de traitement et d'intégration des données, d'écriture des métadonnées, d'archivage des échantillons, etc.

Le travail de réflexion sur les données dans ces communautés a besoin d'être accompagné pour être efficace et suivi d'effets. Les communautés scientifiques auront toujours besoin d'un soutien de la part des organismes de tutelle de la recherche, sous la forme de moyens humains (gestionnaires de données, informaticiens...), financiers (infrastructures de stockage, outils logiciels...) et logistiques (coordination, formations...). Cet accompagnement peut se faire par exemple par la création de nouveau métier type « data manager » dont les compétences englobent les différentes activités présentées avec en plus une connaissance du milieu scientifique. Ce nouveau type de métier permettrait d'améliorer la reconnaissance et la motivation des personnes favorisant le travail de réflexion sur les données. L'accompagnement de l'INSU peut se faire aussi par l'organisation de colloques, atelier de travail ou formation sur ces thèmes.

## LE DÉFI DES VOLUMES DE DONNÉES À TRAITER SUR DES TEMPS COURTS ET DIVERSITÉ DES DONNÉES

- Construire une « Infrastructure de Recherche » data (e.g. type Data Terra, Google Earth Engine) pour l'ensemble des données en y ajoutant la capacité d'effectuer quelques traitements. Cette IR n'a pas forcément vocation à rester limitée aux besoins de l'INSU. Ce point a été longuement débattu. Peut-on se satisfaire des outils non académiques mis à disposition par les GAFAs? Il nous semble que même si cela résout les contraintes économiques c'est un risque trop grand de sortir la recherche de nos instituts. Il y a donc urgence à réagir, car les jeunes doctorants et post-doctorants sont attirés par ces outils faciles d'accès. Il ne sera pas simple de les faire revenir vers nos outils institutionnels.
- Gérer les ressources (humains et matériels) pour mieux prendre en compte la durée de traitement limitée par des contraintes externes (calendriers, projets, etc.). Les contraintes externes nous imposent d'être de plus en plus réactifs. Difficile de réagir alors que le processus de recrutement a une durée incompressible. Doit-on aller vers une mutualisation des ressources humaines?
- Regrouper le plus possible les espaces de stockage et les opérations de traitement dans un seul ou un nombre limité de centres dédiés pour éviter de déplacer les données.
- Développer une couche logicielle commune qui « virtua-

lise » l'accès à l'ensemble des données et permet de mutualiser le stockage et de favoriser l'interopérabilité des outils logiciels.

- Implémenter la nécessité d'effacer des données et ceci malgré les réserves des scientifiques quant à la perte d'informations.
- Mener une réflexion sur des outils intelligents de sélections de données.
- Mener une réflexion sur le déclenchement de l'observation ad hoc pour éviter d'accumuler des données inutiles.
- Agir sur le recrutement lié à la « Data Science »: former des jeunes *Data Scientists* (bourses de Doc/PostDoc, éventuellement transdisciplinaires). Le CNRS pourrait proposer à de jeunes diplômés un financement sur 3 à 5 ans incluant une formation (doctorat) en échange d'un contrat de travail prolongeant sa présence dans l'établissement. L'étudiant y gagne une expérience significative en Data Science très demandée sur le marché du travail. Le CNRS parvient à recruter sur un domaine où nos offres d'emplois ne sont pas concurrentielles. Certains de ces étudiants pourraient aussi vouloir rester dans le monde académique.
- Former les personnels des labos à la Data Science (nécessité d'encadrement)
- Repenser la segmentation classique (production des données vs exploitation, rôle du chercheur vs ingénieur, des étapes séquentielles des traitements, calibration sol vs *data-driven*).
- Le monde de la data-science change nos regards sur nos organisations. La limite entre un travail de recherche et d'ingénierie est de moins en moins bien définie. Il faut veiller à ce que les chercheurs soient reconnus pour ces travaux d'ingénierie et à ce que les ingénieurs soient reconnus pour ce travail de recherche. Où faut-il inventer un statut de chercheur-ingénieur *Data scientist*? Faut-il suivre l'exemple de l'IRD avec sa commission scientifique sectorielle n°5 (CSS5) intitulée « Sciences des données et des modèles », qui recrute comme chercheurs des profils mixtes thématicien/ingénieur?
- Définir quelles parties des chaînes de traitement massives sont confiées aux labos pour en extraire la meilleure science possible.

## PRODUCTION ET TRAITEMENT DES DONNÉES À BORD

- Identifier les compétences au niveau national, avec un recensement des savoir-faire, notamment en Machine Learning;
- Recenser les composants qualifiés pour l'embarqué à l'INSU;
- Mutualiser les moyens (flotte de drones du CNRS) pour réaliser des campagnes de mesures coordonnées et échanger sur les solutions mises en œuvre;
- Utiliser des moyens de test et d'essai génériques;
- Réutiliser ce qui existe déjà: outils communs pour les logiciels embarqués, briques logicielles génériques qualifiées (TM/TC, HKs, mémoire);
- Échanger entre projets, entre laboratoires: retours d'expérience;

- Préparer l'aide à la réutilisation d'un projet à l'autre ;
- Organiser des formations aux outils génériques développés dans les laboratoires ;
- S'appuyer sur les développements grand public pour l'embarqué (Arduino, objets connectés...) qui disposent de plus en plus de puissance embarquée (pour le calcul, les volumes de stockage ;
- Participer à des développements de traitements bord génériques grand public ;
- S'associer aux industriels pour les futurs processeurs qualifiés embarquant de l'IA ;
- Nouer des partenariats avec les industriels et les réseaux étudiants dans les CSU pour explorer des solutions nouvelles rapidement (exemple: tester en vol des composants en phase de qualification ;
- Mettre en place de la prestation de service pour développer du logiciel de vol sans valeur scientifique ajoutée.
- En termes de formation, il apparaît nécessaire d'organiser des écoles thématiques ciblées en Machine Learning embarqué et de continuer les formations en conduite de projet. Bien entendu, l'effort de formation doit s'appuyer sur les réseaux métier et les ateliers existants traitant sur la thématique des données et logiciels embarqués. Par exemple, un nouveau réseau Drones a été créé. Les drones sont très porteurs pour faire de la science interdisciplinaire, et adressent le problème des communications, du stockage et du traitement de données. Il est recommandé de coordonner le réseau Drones avec les CSU (Centre Spatiaux Universitaires) pour les nanosatellites, et les AEI (Ateliers Expérimentation et Instrumentation).

## LOGISTIQUE DES DONNÉES, WORKFLOW

- Infrastructure logicielle: mettre en place des systèmes de gestions de données distribuées sur les centres de calculs (en particulier les centres régionaux et nationaux);
- Infrastructure matérielle: associer des espaces de stockages connectés localement aux moyens de calculs pour entreposer les données;
- Espaces d'entreposage ou d'archivage: proposer des espaces d'entreposage ou archivages de volumétrie adaptée pour les données à conserver (à moyen ou long terme);
- Autorisation et authentification: généraliser l'usage des systèmes de délégation d'autorisation et d'authentification pour l'accès aux ressources;
- Financement: proposer et mettre en place un modèle économique soutenable pour la mise en place, l'utilisation et la pérennisation de ces ressources partagées ;
- Ressources humaines: il est nécessaire de moderniser les référentiels de Bap E afin d'intégrer des compétences liées aux nouvelles architectures matérielles ;
- Une action se dégage comme prioritaire: engager une convergence des moyens de stockage, de traitement et de calcul entre les autres instituts du CNRS (en particulier avec l'INS2I et l'IN2P3) et les méso-centres, afin de fournir des services accessibles aux projets et aux équipes qui relèvent de l'INSU, dans le cadre des recommandations énoncées ci-dessus.

## DATA MANAGEMENT PLAN (DMP) ET MACHINE ACTIONNABLE DATA MANAGEMENT PLAN (MADMP)

- Systématisation des DMP: Quelle que soit leur taille, tous les projets visant à produire des données devrait rédiger un DMP ;
- Formation de l'équipe de recherche: L'accompagnement local pour former à la culture du DMP doit être généralisé ;
- Utilisation privilégiée de l'outil DMP-Opidor: L'INIST a mis en place DMP-Opidor, logiciel en ligne permettant l'édition collaborative de DMP. Cette outil devrait être privilégié afin de centraliser les différents DMP de l'INSU. En contrepartie cet outil devra renforcer ses fonctionnalités: a) d'adaptation locale d'un DMP aux besoins d'une communauté ou d'un laboratoire et b) de consultation des DMP des autres équipes ;
- Mise en place collaborative des maDMP autour de maDMP-Opidor: L'INIST - fort de son implication dans les organismes normalisant les maDMP - a initié le développement d'outils permettant leur mise en place: maDMP-Opidor. C'est dans le cadre de cette démarche que les différents centres de données doivent mettre en places les services locaux nécessaires aux maDMP.

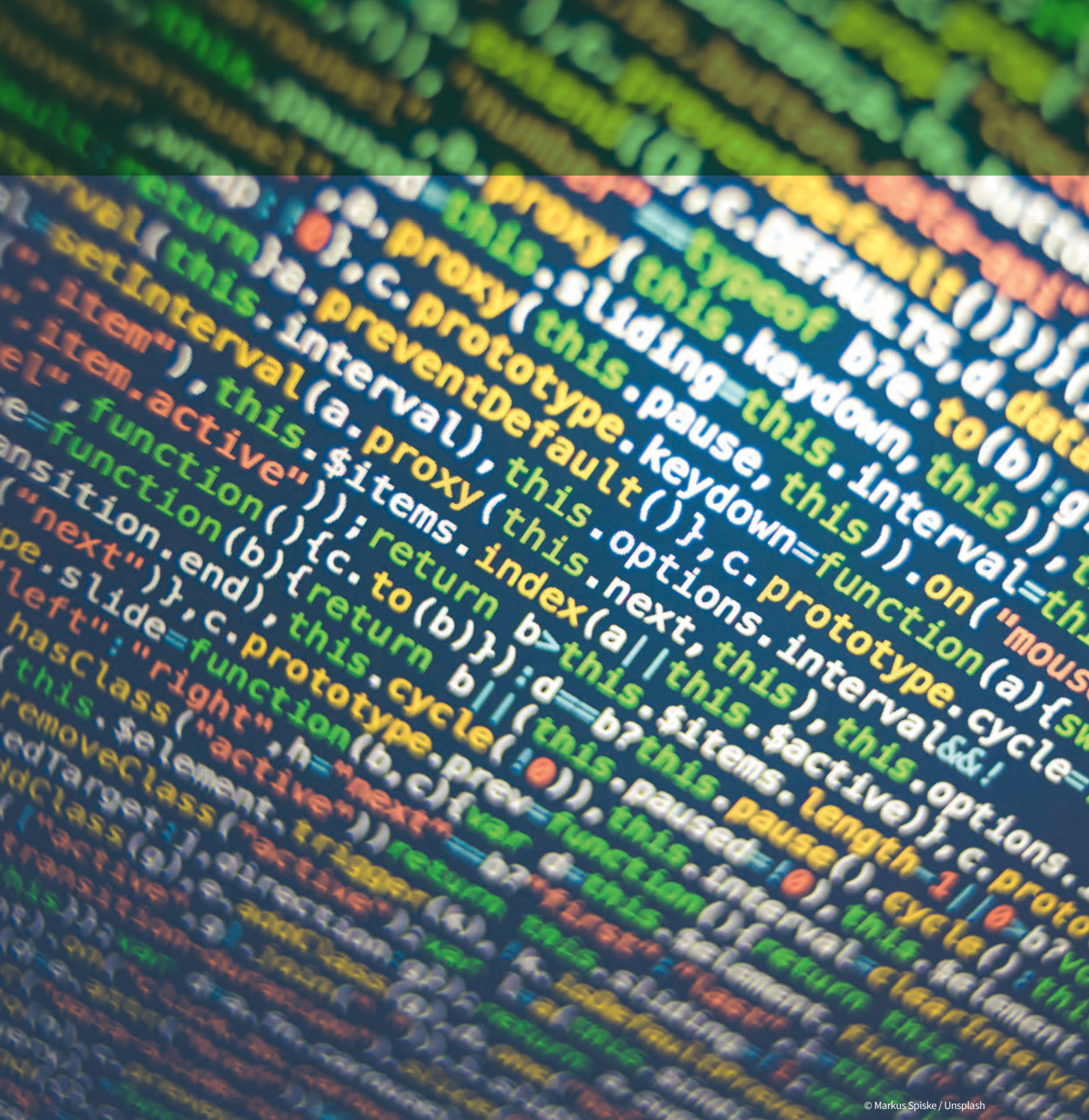
## WORKFLOWS

- Mise en place de communautés technologiques: Que cela soit autour des réseaux transverses de la MITI - notamment DevLog ou Calcul, ou d'autres réseaux INSU (SIST, Interpôles), la problématique des moteurs de workflows doit être mieux prise en compte et faire l'objet de groupes de travail spécifiques. La réflexion doit porter sur la réalisation de cas d'études ou la rédaction de guides de choix technologiques. Ces communautés doivent également devenir les lieux d'échange et de mutualisation des travaux ;
- Intégrer la thématique de logistique des données dans la réflexion sur les workflows.

# Défi 14

## Accès ouvert aux données

**Conseil scientifique:** Caroline Bot, Françoise Genova, François André, Mark Allen, François Bonnarel, Aude Chambodut, Sylvie Galle, Maryvonne Gérin-Laslier, Frédéric Huynh, Helle Pedersen, Véronique Stoll, Jérôme Vergne.



© Markus Spiske / Unsplash

Les données sont au cœur de la démarche scientifique de l'INSU. Le partage des données est l'un des axes transverses forts de l'Institut, qui a depuis longtemps une politique volontariste pour le soutenir. L'INSU est certainement en pointe dans ce domaine où il s'est impliqué bien en amont du développement des principes «FAIR» (Facile à Trouver/Findable, Accessible, Interopérable, Réutilisable) et de l'adhésion politique au concept de Science Ouverte, tel qu'il s'exprime en particulier dans le Plan National pour la

Science Ouverte publié par le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation et dans la Feuille de Route Science Ouverte du CNRS. C'est donc très naturellement que l'INSU consacre aux données un des Défis de son premier exercice de prospective transverse.

# 1. Contexte et enjeux

## LE CONTEXTE FAIR NATIONAL, EUROPÉEN ET INTERNATIONAL

L'accès ouvert aux données scientifiques est un sujet « chaud » au niveau international, avec de nombreuses injonctions politiques, et au niveau européen, avec la devise « *Open Science, Open Innovation, Open to the World* » de la Commission Européenne et le fort soutien qu'elle apporte au développement de l'European Open Science Cloud (EOSC<sup>1</sup>). Au niveau national, le Plan National pour la Science Ouverte publié par le MESRI en 2018 et la récente feuille de route pour la science ouverte du CNRS ont chacun un volet sur les données.

Dans le contexte international, on note le développement rapide de la Research Data Alliance (RDA<sup>2</sup>), un forum neutre qui permet de discuter de tous les aspects du partage des données et d'émettre des recommandations. Son chapitre français, le Nœud national RDA France, est actif depuis mars 2018. Les principes FAIR, définis dans un article publié en 2016, ont rapidement conquis un rôle central dès qu'il est question du partage des données. Le groupe de travail RDA FAIR Data Maturity Model définit les critères de bases de la « FAIRitude ». Il faut veiller à ce que les pratiques disciplinaires soient prises en compte.

L'objectif reste bien de faire de la science de façon plus efficace. Le partage des données demande un travail au niveau des disciplines pour s'entendre en particulier sur les formats, les métadonnées et les protocoles d'échange des données. Les données sont au cœur de la démarche scientifique des disciplines de l'INSU, et certaines ont été et restent pionnières, par exemple pour les données de géophysique d'observation continue ou l'astronomie avec les standards de l'observatoire virtuel (OV) : leurs données sont partagées au niveau international et largement réutilisées par les communautés et au-delà.

La « FAIRisation » permet donc une révolution dans les méthodes de travail des chercheurs, mais elle a un coût et il est important de réfléchir aux données à « FAIRiser » en priorité. Le partage interdisciplinaire des données est aussi souvent présenté comme l'objectif de la science ouverte, mais lui aussi a un coût, et il faut partir de cas d'utilisation et prendre en compte les cadres existants de partage des données. L'INSU fournit de beaux exemples : on peut citer l'étude des ondes gravitationnelles, et celle du système Terre lui-même.

Les infrastructures de recherche et les projets jouent un rôle important dans l'écosystème des données de recherche. Les Infrastructures de Recherche de la Feuille de Route ES-FRI et celles de la Feuille de Route Nationale structurent le paysage. Toutes produisent des données, et certaines, telles l'IR CDS<sup>3</sup> et l'IR Data Terra<sup>4</sup>, sont des infrastructures scientifiques de données et de services. De nombreux projets européens sont aussi liés aux données, en particulier certains projets en support aux ESFRI et/ou à l'EOSC. Les Clusters tels ESCAPE<sup>5</sup> et ENVRI-FAIR<sup>6</sup> jouent un rôle particulier dans le paysage pour nos disciplines.

## GESTION SCIENTIFIQUE DES DONNÉES ET SERVICES : PLATEFORMES DE PARTAGE DES DONNÉES, OBSERVATOIRES ET INFRASTRUCTURES DE RECHERCHE

La gestion des données et des services scientifiques de données est un élément clé pour permettre la science ouverte. Les données qui sont collectées et traitées par les observatoires sol et spatiaux, les laboratoires, les expériences de nos disciplines scientifiques, et publiées en même temps que les articles de journaux, sont une ressource précieuse qui sous-tend les résultats scientifiques qui en découlent. La gestion des données est une nécessité absolue afin de les rendre utilisables et réutilisables pour la recherche scientifique, y compris l'attribution de « métadonnées » détaillées qui décrivent les données elles-mêmes, ainsi que l'utilisation de standards communs pour les formats de données et les cadres d'interopérabilité. La recherche scientifique exige un niveau élevé de gestion des données, avec des rôles pour les scientifiques, les ingénieurs logiciels et les documentalistes, qui sont tous nécessaires pour offrir des services scientifiques sur les données à l'usage des chercheurs (et des communautés éducatives et scientifiques publiques plus larges) selon les principes FAIR.

La gestion des données et des services scientifiques a tout d'abord été abordée du point de vue des infrastructures de recherches : le CDS et Data Terra. Les présentations des deux IR lors de l'atelier ont détaillé leur organisation et leur gouvernance, ainsi que leur rôle aux niveaux national, européen et international. Ces infrastructures de recherche sont responsables d'une grande diversité de données en astronomie et en sciences de la Terre et de l'environnement, et elles fournissent toutes les deux des services thématiques spécifiques pour l'utilisation scientifique des données.

1- <https://ec.europa.eu/research/openscience/index.cfm?pg=open-science-cloud>

2- <https://www.rd-alliance.org/>

3- <http://cdsweb.u-strasbg.fr/index-fr.gml>

4- <https://www.data-terra.org/>

5- <https://projectescape.eu/>

6- <https://envri.eu/home-envri-fair/>

L'origine et les échelles de ces infrastructures sont différentes, leurs rôles et organisations aussi. Par exemple, l'un des points forts reconnus du partage des données en astronomie est l'observatoire virtuel, qui fournit le cadre pour des données et des services interopérables. Pour l'observation et la science du système terrestre et de l'environnement, une infrastructure de données et de services intégrée et distribuée est nécessaire. Il existe cependant des explorations communes comme sur la meilleure façon d'utiliser les infrastructures de données génériques qui émergent rapidement (par exemple, EOSC et les infrastructures digitales européennes, nationales et régionales). Leur approche de la notion de centre (ou de plateforme) de données à vocation scientifique est aussi similaire. Enfin, la réponse aux besoins des communautés scientifiques, qui est la pierre de touche de leur activité et le défi des *big data* sont des points communs forts.

Les structures propres à l'INSU, les Observatoires des sciences de l'Univers et les Services nationaux d'observation dont la labellisation permet d'assurer la qualité, sont aussi impliquées dans la gestion et le partage des données.

### AUTRES DONNÉES : DONNÉES DE LONGUE TRAÎNE, DONNÉES ATTACHÉES AUX PUBLICATIONS, DONNÉES HORS SNOS, DONNÉES NON NUMÉRIQUES

Les données de la recherche sont parfois difficiles à saisir car extrêmement variées, de nature différente (brutes, réduites...), sur supports variés (carnets de laboratoire, logiciels...), de types hétérogènes (données numériques et non-numériques...). De nombreuses données sont peu structurées, non publiées, voire invisibles (*dark data*) et peuvent rapidement devenir inexploitables. La disponibilité des données se dégrade fortement avec le temps, même lorsqu'elles ont été associées à une publication. Par ailleurs, de nombreux codes et logiciels deviennent inexploitables ou disparaissent, entraînant également l'impossibilité d'exploiter<sup>7</sup> des données.

La longue traîne est un objet de préoccupation pour toutes les communautés par-delà les frontières, par exemple discuté au sein de la RDA. Elle l'est d'autant plus que la communauté scientifique est aujourd'hui tenue de rendre accessibles les données obtenues par des financements publics (H2020, ERC, ANR...). Mettre à disposition ses données est en outre un gage d'intégrité et de transparence scientifique<sup>8</sup>. La réutilisation des données de la longue traîne ouvre éga-

lement de nouveaux champs de recherche en agrégeant des données hétérogènes et se révèle une opportunité économique non négligeable. Il est essentiel de développer des ressources qui soutiennent les besoins de la communauté en matière de publication et gestion des données, avec des outils pilotés par les besoins scientifiques. Il faut noter cependant que le cadre juridique autour des données de la recherche reste complexe à appréhender devant l'absence de droit unifié de la donnée<sup>9</sup>.

La responsabilité de la gestion des données incombe aux producteurs des données. Mais l'absence de reconnaissance du temps dévolu à la bonne gestion des données dans la carrière des chercheurs et des personnels d'accompagnement de la recherche incite peu à les « FAIRiser ». Le besoin en ressources humaines qualifiées pour traiter les données et les métadonnées devient criant. La gestion des données mobilise dans l'absolu de nombreux acteurs, aux compétences différentes: chercheur, informaticien, spécialiste IST, archiviste, juriste... Or elle n'est pas encore pleinement prise en compte dans les référentiels métiers comme Referens, alors même que de nouveaux métiers apparaissent. Se pose également la question de la formation initiale et continue des chercheurs à la science des données.

### DESCRIPTION DES DONNÉES, FORMATS, HARMONISATION DONNÉES/MÉTADONNÉES

La standardisation des formats, des métadonnées, qui incluent les vocabulaires, et des modèles de données sont indispensables pour réussir l'objectif de l'interopérabilité des données sans laquelle l'intérêt de la science ouverte est fortement réduit. Même si notre institut comporte 4 « domaines » la discussion s'est organisée en deux volets: astronomie et astrophysique d'une part et « Observation de la Terre » (Terre solide, Surfaces et Interfaces Continentales, Océan Atmosphère) d'autre part.

En astronomie et astrophysique la standardisation a commencé très tôt, en particulier par la définition d'un format commun, FITS, parce que l'échange des données était un besoin scientifique fondamental et la collaboration internationale, essentielle pour définir des standards, était une pratique déjà bien établie. La démarche a été systématisée par la conceptualisation de l'observatoire virtuel et la création, dans les années 2000/2002, de l'International Virtual Observatory Alliance (IVOA) qui définit les standards de celui-ci. Depuis cette date on enregistre 45 standards de formats, protocoles, et modèles de données qui couvrent

7- Par exemple des archives orphelines des premières missions spatiales du CNES dans les années 1970.

8- Voir la politique de nombreux éditeurs par rapport au dépôt des données liées aux publications.

9- Loi Valter (2015), loi pour une république numérique (2016), RGPD (2018), figurant dans le Code de la recherche et le Code des relations entre le public et l'administration.

divers aspects des principes FAIR pour différents types de données.

Le cadre de travail fourni par l'IVOA et les standards qu'elle développe sont largement reconnus par les développeurs d'applications et les fournisseurs de données comme le moyen de réaliser l'interopérabilité et l'ouverture des données. Il reste de nombreux chantiers, les standards doivent être maintenus sur la durée et les besoins nouveaux, en particulier ceux des grandes infrastructures de recherche, doivent être pris en compte, mais il est admis qu'ils seront résolus dans le cadre commun fourni par l'IVOA. En France l'Action spécifique observatoires virtuels coordonne la participation française à l'IVOA et la dissémination des bonnes pratiques.

Dans le domaine de l'observation de la Terre, les dernières années ont vu des progrès importants dans les problématiques d'harmonisation des données, d'abord au sein du monde scientifique académique avant d'aller vers les utilisateurs tiers. Ainsi on peut citer les standards mis en avant par l'Open Geospatial Consortium (OGC) et leur équivalent dans la norme ISO. Toutefois, des écueils structurels relativisent ces progrès et freinent leur adoption (les implémentations incomplètes, la concurrence entre standards couvrant les mêmes besoins, l'abandon ou l'absence de standards, la complexité, le manque d'homogénéité du contenu, etc.). Ainsi, fréquemment, la mise en place de mécanismes d'interopérabilité ne se fait pas de manière automatique et nécessite une réalisation spécifique. Sur le problème particulier de l'harmonisation des vocabulaires, le web sémantique est une piste intéressante mais pas encore assez pérenne.

Globalement pour l'observation de la Terre les difficultés sont dues principalement à l'hétérogénéité des données observées, à l'indépendance des différentes communautés scientifiques et à l'absence d'un organisme de référence unique autour des standards. Néanmoins au niveau français des progrès sont réalisés par l'articulation entre les centres de données et service, les pôles de données THEIA, ODATIS, FORMATER, AERIS et l'IR DataTerra.

Quelques pistes communes à tous les domaines de l'INSU semblent se dégager telles que l'implication conjointe des personnels chercheurs, informaticiens et documentalistes chargés des questions d'harmonisation et de formats dans les centres de données et les laboratoires, l'existence d'une coordination nationale sous l'égide de l'INSU ou encore la participation active de beaucoup aux travaux d'harmonisation internationaux et la nécessité que celle-ci soit explicitement soutenue et reconnue. Le volet formation des communautés est important tant au niveau de la formation initiale des futurs chercheurs qu'au niveau de la formation continue pour les chercheurs et les IT.

## CERTIFICATION DES ENTREPÔTS DE DONNÉES ET DE SERVICES

Tous les acteurs ayant un intérêt aux données (financeurs, créateurs et propriétaires, utilisateurs) veulent être assurés que la structure au sein de laquelle les données sont rendues disponibles est pérenne, solide et répond aux bonnes pratiques de gestion. Le principe émergent pour les entrepôts de données et de services, pendant du principe FAIR pour les données, est le principe TRUST (*Transparency, Responsibility, User Community, Sustainability, Technology*).

Les entrepôts de données et de service doivent donc établir un climat de confiance. Ils doivent montrer des politiques transparentes, une organisation, des ressources financières et humaines adéquates, propres à leur permettre d'assurer leur mission de manière durable et sécurisée.

La certification est pour eux LE moyen de prouver en toute transparence leur fiabilité (idéalement via des liens vers de documents publics). En effet, c'est une procédure destinée à faire valider, par un organisme indépendant, la conformité d'un entrepôt de données et de services à des normes, des standards en vigueur ou à un référentiel de qualité officiellement reconnus. L'infrastructure technique, les aspects organisationnels, financiers, juridiques, de ressources humaines, les workflows, la gestion des risques, etc. sont évalués lors d'une certification. Il est important de rappeler ici que la certification permet l'évaluation de l'entrepôt lui-même et de ses procédures, et non pas de la qualité des données et/ou leur valeur pour la communauté.

Au niveau international, un certain nombre de procédures de certification, synergiques ou complémentaires, coexistent: CoreTrustSeal<sup>10</sup>, la norme DIN 31644/NestorSeal<sup>11</sup>, la norme ISO 16363<sup>12</sup>, etc. Au niveau européen, la Certification est clairement identifiée dans les plans stratégiques de l'European Open Science Cloud ou du Group of European International Council for Science Members.

Au niveau national, la Certification est de la même façon évoquée dans le Plan National pour la Science Ouverte du MESRI et la Feuille de Route du CNRS, et dans les feuilles de route des Infrastructures elles-mêmes. En France, deux entrepôts (SISMER et le CDS) ont à ce jour obtenu une certification CoreTrustSeal, la mieux adaptée au cas des services développés dans un environnement scientifique. Des initiatives autour de la certification ont vu le jour en France comme par exemple les projets de l'Infrastructure de Recherche Data Terra dans le cadre de l'Appel Flash « Science Ouverte » 2019 de l'ANR (CEDRE<sup>13</sup>, COPILOTE<sup>14</sup>) ou le groupe de partage sur la certification<sup>15</sup> de RDA-France.

10- <https://www.coretrustseal.org/>

11- [https://www.langzeitarchivierung.de/Webs/nestor/EN/Zertifizierung/nestor\\_Siegel/nestor\\_siegel\\_node.html](https://www.langzeitarchivierung.de/Webs/nestor/EN/Zertifizierung/nestor_Siegel/nestor_siegel_node.html)

12- <http://www.iso16363.org/>

13- <https://anr.fr/fr/lanr-et-la-recherche/engagements-et-valeurs/la-science-ouverte/les-projets-laureats-de-lappel-flash-science-ouverte/projet-cedre/>

14- <https://anr.fr/fr/lanr-et-la-recherche/engagements-et-valeurs/la-science-ouverte/les-projets-laureats-de-lappel-flash-science-ouverte/projet-copilote/>

15- <https://www.rd-alliance.org/la-certification-des-entrepots-de-donnees>

## COMPÉTENCES ET MÉTIERS

L'accès ouvert aux données scientifique et la gestion des données nécessite la complémentarité de plusieurs métiers et de compétences différentes (chercheurs, informaticiens, documentalistes, juristes...) et on observe l'émergence de nouveaux métiers (*Data analyst*, *Data architect*, *Data steward*, *Data scientist*...) qui ne sont pas toujours définis de façon claire et univoque. L'importance d'identifier, de

reconnaître et de valoriser les métiers liés à la gestion des données et à leur préservation a été soulignée. Une action concrète est d'en faire la liste, en identifiant les compétences nécessaires à chacun. Il est important de mettre en avant et de valoriser le travail sur les données comme étant spécifique et complémentaire de celui sur l'algorithmique d'une part et de celui sur les aspects infrastructure et systèmes de l'informatique d'autre part.

## 2. Recommandations

Au cours de cet exercice de prospective sur la question de l'accès ouvert aux données scientifiques dans les différentes disciplines de l'INSU, nous avons donc abordé le contexte FAIR, la question de la gestion scientifique des données et des services mais aussi des données « hors observatoire » et enfin les questions d'harmonisation des modèles de données et métadonnées et de certifications des entrepôts de données et services. Au travers de ces différents points de vue, certains thèmes sont apparus de manière récurrente, et une fraction significative des recommandations produites par les différentes sessions se recoupaient. Les thèmes récurrents sont résumés ci-dessous. Ce résumé est suivi de la liste des recommandations, qui ont été regroupées par thèmes pour éliminer autant que possible les redites, rapprocher les éléments complémentaires, et faciliter leur lecture et leur prise en compte.

Tout d'abord, la science doit être au cœur du processus et rester le moteur des évolutions et des choix stratégiques. L'objectif reste bien de faire de la science de façon plus efficace. Le pilotage par les besoins scientifiques est primordial. Il est donc essentiel de soutenir les centres de données et de services pilotés par la science, et de fournir aux communautés des outils adéquats définis par les besoins scientifiques.

Ensuite, il transparait aussi un besoin d'état des lieux, tant du côté des services FAIR et des entrepôts de données pour lesquels il faudrait faire l'inventaire de ce qui existe, que du côté de la diversité des métiers liés aux données et de leurs spécificités. Pour la première facette, l'un des aspects est de participer à l'inventaire des services dont le CNRS est responsable et qu'il met en œuvre. Il faut aussi faire l'inventaire des autres services utilisés par les chercheurs pour clarifier le paysage national et guider les chercheurs dans la multitude d'offres (nombreuses initiatives des organismes de recherche et universités, services thématiques utilisés par les communautés mais qui ne sont pas forcément en France...).

Cet exercice permettra aussi de documenter le besoin d'un entrepôt de données de longue traîne CNRS. Pour ce qui est des métiers, le besoin se fait sentir de faire la liste des nouveaux métiers liés aux données en les définissant proprement, mais aussi celle des compétences nécessaires et des besoins des communautés. Il faut pouvoir recruter les personnels sur le vrai métier qu'ils font et reconnaître leur compétence et leur travail dans leur évolution de carrière.

La notion des coûts (humains, en temps, financiers...) et son pendant qui est la nécessité de définir des priorités, ont bien entendu traversé l'ensemble des discussions. La FAIRisation permet une révolution dans les méthodes de travail des chercheurs mais elle a un coût et il est important de réfléchir aux données à « FAIRiser » en priorité. Le partage interdisciplinaire a aussi un coût et il faut partir de cas d'utilisations et prendre en compte les cadres existants de partage des données. La certification a un coût mais elle permet de se poser les bonnes questions pragmatiques. Des soutiens sont nécessaires pour les ressources humaines et le support aux centres de données et de services pilotés par la science. Pour les infrastructures de recherche, il est nécessaire de définir les problématiques et d'avoir un socle minimum de financement récurrent sur lequel fonctionner. De manière générale, le besoin est d'avoir des financements sur les données pour des durées qui sont supérieures aux durées des projets. Cela pourrait se faire en mettant en place des *overheads* sur les projets pour la gestion des données qui en seront issues. Le temps dévolu à la bonne gestion des données doit être reconnu dans la carrière des personnels. Des nouvelles compétences sont nécessaires et il faut apporter un soutien à ces nouveaux métiers.

Enfin, le contexte international, européen et national du partage des données scientifiques et de la science ouverte est en évolution rapide, et la réflexion sur la prise en compte du contexte et de son évolution et l'articulation des différents niveaux doit se poursuivre.

## RECOMMANDATIONS DÉTAILLÉES DU DÉFI « ACCÈS AUX DONNÉES »

### [R1] PILOTAGE PAR LES BESOINS SCIENTIFIQUES

Le pilotage de l'ensemble des aspects de la gestion et du partage des données scientifiques par les besoins scientifiques est essentiel. Ce pilotage doit être effectif pour les infrastructures et les centres et services de données, l'établissement des priorités sur tous les aspects où il est nécessaire de le faire, les changements culturels, et les aspects techniques et de ressources humaines. C'est aussi un moyen de différencier nos services de ceux des grands opérateurs de type GAFAM.

### [R2] PILOTAGE NATIONAL

[R2.1] La structuration au niveau national des OSU, des IR et des ANO/SNO, en l'accompagnant évidemment des collaborations inter-organismes nécessaires, est un atout pour l'INSU.

[R2.2] Il faut utiliser le pilotage national pour mettre en place les conditions pour proposer des services de l'EOSC qui soient adaptés aux besoins scientifiques de la communauté.

### [R3] FINANCEMENT

[R3.1] Les infrastructures et services de données nécessitent un financement pérenne, en particulier en termes de ressources humaines, au-delà de financements sur projets.

[R3.2] Il a été proposé de mettre en place un *overhead* sur les projets pour la gestion des données (10 %) en particulier pour les projets qui ont des exigences de mise à disposition des données.

### [R4] SOUTIEN AUX INFRASTRUCTURES THÉMATIQUES

[R4.1] Les IR et les centres de données et de services thématiques pilotés par la science doivent être soutenus (Action 4 de l'Axe 2 de la Feuille de Route CNRS). L'INSU porte des exemples phares d'IR, avec le CDS et l'IR Data Terra.

[R4.2] L'INSU doit développer et diffuser sa vision commune des centres de données et de services pilotés par les besoins scientifiques, qui pourrait être partagée au sein du CNRS, par exemple avec l'IR Huma-Num de l'INSHS.

[R4.3] La duplication des données dans plusieurs entrepôts différents est un risque de plus en plus important. Dans ce contexte, il faut :

- des recommandations institutionnelles de préférer les entrepôts thématiques, qui assurent la qualité des données et des services, en accord avec le Plan National pour la Science Ouverte ;
- fédérer les dépôts de données par moissonnage des métadonnées pour éviter la duplication des données.

### [R5] LES INFRASTRUCTURES DE RECHERCHE DANS UN PAYSAGE EN ÉVOLUTION

[R5.1] Les questions suivantes doivent être instruites en particulier par les IR pour leur permettre de continuer à remplir leur rôle dans un paysage en évolution rapide, avec comme guide majeur les besoins de leurs communautés :

- Comment faire face au déluge de données en quantité et en complexité ainsi qu'à la diversité de leurs usages ?

- Comment évoluer dans un environnement en évolution (données ouvertes, émergence de l'EOSC, infrastructures génériques nationales et locales) ?

[R5.2] La participation à des activités plus larges, telles que le développement de l'EOSC, sont essentielles pour assurer qu'elles répondront aux besoins des communautés. Il faut pour cela pérenniser les activités démarrées sur projet.

[R5.3] Il serait utile de pouvoir échanger des informations entre les différents projets liés à l'EOSC via l'identification de personnes de contact en réseau.

### [R6] MISE EN PRIORITÉ

[R6.1] Toutes les données n'ont pas vocation à être FAIR et pour combien de temps. Il faut que les données produites par les IR et les SNO soient FAIR, ainsi que celles liées aux publications.

[R6.2] Les données de longue traîne correspondent à une masse importante de données, numériques et non numériques et de logiciels. Il faut prioriser et il est important de documenter en amont toutes les données.

[R6.3] La mise en place du processus de certification doit prendre en compte trois critères stratégiques : le rôle d'acteur majeur dans leur domaine scientifique, le contexte d'utilisation étendue et la pérennité des dépôts de données.

### [R7] ANALYSE DU PAYSAGE

[R7.1] Le paysage des entrepôts et des services de données est complexe et en pleine évolution. L'INSU doit contribuer à la mise en œuvre et à la maintenance des répertoires au CNRS par le GT Données de la DIST sur la base de Cat OPI-DoR :

- L'inventaire des services que le CNRS met en œuvre et auxquels il participe. L'INSU doit y faire ressortir les aspects inter-organismes de ses activités sur les données.

- L'analyse du paysage ne doit pas se limiter aux services du CNRS. Les chercheurs doivent être guidés parmi la multitude de l'offre de l'ESR, en intégrant les services thématiques utilisés par les communautés.

[R7.2] La clarification du paysage national permettra de documenter le besoin éventuel d'un entrepôt propre à l'INSU ou au CNRS (Action 4 de l'Axe 2 de la Feuille de Route pour la Science Ouverte du CNRS).

[R7.3] De nouvelles compétences et de nouveaux métiers sont nécessaires en support à la gestion des données (spécialistes des DMP, Data Manager, Data Scientist, Data Steward, spécialistes d'extraction des données de la littérature vers les bases de données et systèmes d'information, informaticiens spécialisés en gestion des données, juriste...) et pas toujours bien définis. Il faut analyser les métiers nécessaires pour la prise en charge des données et les compétences qui doivent leur être associées pour documenter leur prise en compte dans les référentiels métiers et les évaluations.

### [R8] RESSOURCES HUMAINES ET GESTION DES PERSONNELS/RECONNAISSANCE DES COMPÉTENCES

[R8.1] L'implication de tous les acteurs de la gestion des données doit être reconnue et valorisée. Il faut reconnaître ces tâches dans les évaluations, en faisant reconnaître leurs spécialités dans les référentiels. Ce point est important dès

le recrutement et pour les évolutions de carrière des chercheurs et des IT (surtout ceux des BAP F et E).

[R8.2] Il pourrait être utile de mettre en place un réseau « données » multi métier.

[R9] Évolution de la culture du milieu scientifique, organismes, laboratoires et personnels

[R9.1] Faire évoluer la culture des scientifiques sur la gestion des données et vis-à-vis du sentiment de propriété qu'ils peuvent avoir. Il est essentiel que la provenance des données reste attachée à celles-ci tout au long de leur cycle de vie.

[R9.2] Il faut mettre en place des correspondants/référents données dans l'environnement des chercheurs. Le niveau le plus pertinent pourrait être celui des OSU plutôt que des laboratoires.

[R9.3] La formation est importante et il faut mettre l'accent sur la formation en gestion des données dès le M2, puis en école doctorale. Il pourrait être envisagé d'élaborer des « kits pédagogiques » à partager au sein de l'INSU. La sensibilisation en continu des chercheurs est nécessaire, mais aussi des tutelles (top-down vers les DU, évaluations HCERES...).

[R9.4] Les labellisations des SNO doivent prendre mieux en compte le contexte FAIR, en particulier la FAIRisation des services et la participation à la définition des pratiques FAIR de la discipline.

[R9.5] Les Plans de Gestion des Données doivent être utilisés comme des outils de réflexion utiles sur les données et leurs cycles de vie, et non pas seulement vus comme un fardeau administratif, comme c'est souvent le cas.

[R10] ASPECTS TECHNIQUES, STANDARDS

[R10.1] Dans le domaine astronomie-astrophysique, le consensus de la communauté est que les standards de l'Observatoire Virtuel sont le moyen de réaliser l'ouverture des données et l'interopérabilité. Il faut continuer à soutenir l'Action Spécifique Observatoires Virtuels.

[R10.2] Pour l'observation de la Terre, les standardisations se font à des niveaux divers suivant les domaines et il n'est pas souhaitable de tout unifier. Il faut tout de même limiter le nombre d'interlocuteurs et de mettre en commun les pratiques et solutions. L'IR Data Terra joue un rôle essentiel qu'il faut renforcer.

[R10.3] Malgré l'inhomogénéité entre les domaines de l'observation de la Terre, il est essentiel de pouvoir accéder aux données qualifiées des autres domaines pour l'interprétation de ses propres données. Il existe la possibilité de construire des plateformes scientifiques utilisant des API ou des interfaces vers des bases de données standardisées.

[R10.4] Des pistes de travail communes entre astronomie & astrophysique et observation de la Terre ont été identifiées. La question du forçage astronomique des phénomènes terrestres ou la planétologie se situent à l'interface entre les deux champs disciplinaires et a donc besoin d'utiliser des standards des deux domaines et de développer des couches de « traduction » des données. Enfin, sur certaines problématiques méthodologiques générales, une harmonisation semble possible entre les deux domaines. Il faut réfléchir à la mise en place de lieux de rencontre, d'échange et de discussion.

[R11] CERTIFICATION DES ENTREPÔTS ET SERVICES DE DONNÉES

[R11.1] Pour un entrepôt de données et de services, la mise en œuvre de la certification a un coût, financier et en personnel, mais la plupart des éléments rédactionnels existent en filigrane. Il faut les mettre en forme, et se poser les bonnes questions sur ses propres pratiques. La Certification n'est pas que scientifique ou technique, elle implique aussi la gouvernance, c'est à dire un engagement des instances dans la description des synergies et du positionnement de l'entrepôt au sein d'une vision globale.

[R11.2] L'auto-évaluation est très utile, même si l'entrepôt ne va pas jusqu'au dépôt d'une demande de labellisation. Il est nécessaire de mener une action concrète pour transposer les critères de certification en objectifs à atteindre/questions auxquelles il faut répondre pour les entrepôts de données à court, moyen ou long terme selon leur maturité et favoriser l'auto-évaluation à court terme. Une étape intermédiaire d'évaluation sera nécessaire pour chaque entrepôt avant qu'il s'engage dans un processus plus lourd. Il faut proposer une méthodologie pour que l'INSU puisse se projeter à 5-10 ans.

# Défi 15

## Nouveaux capteurs environnementaux

**Conseil scientifique : Olivier Charade, Pascal Conan, Fabrizio D'ortenzio, Valérie Gros, Franck Lartaud, Sébastien Payan, Marc Picheral, Mireille Pujo-Pay, Vincent Raimbault, Christian Tamburini, Eric Thiebault, Renaud Vuillemin.**

Si le développement de capteurs physico-biogéochimiques dédiés à caractériser l'environnement a progressé, caractériser et mesurer les processus aux interfaces à travers la mesure de composantes biotiques et abiotiques *in situ* restent encore très difficiles, tout comme l'intégration de nouvelles technologies de capteurs miniaturisés (ex. solutions micro-fluidiques couplés à des systèmes de détection physiques, optiques, ou électrochimiques).

Il est important d'accroître le niveau des connaissances de nos communautés en opérant une évolution et un renforcement de structuration permettant un rapprochement indispensable entre les laboratoires développeurs de technologies, dont la technologie elle-même représente le sujet scientifique, et les laboratoires INSU utilisateurs de technologies pour lesquels l'observation du sujet d'étude motive les développements technologiques.

Des techniques d'imagerie permettent par exemple de mesurer *in situ* des spectres de tailles de la matière particulaire > 100µm et des organismes. Des spectromètres de masse miniaturisés conçus pour les études multi-élémentaires basées sur mesures des gaz à de très faibles concentrations permettront des avancées notables dans tous les domaines. De même, les données génomiques représentent des paramètres clés pour surveiller et comprendre la composante biotique des océans ouverts et les écosystèmes côtiers. Il est raisonnable d'envisager que d'ici une dizaine d'années, les scientifiques seront en mesure de développer et de mettre en œuvre des capteurs génétiques *in situ* en temps réel. Ces technologies si elles sont actuellement développées pour le domaine Océan, pourraient également s'appliquer aux autres domaines de l'INSU.



# 1. Atouts, manques et besoins

## CONCEPTS

**Mots clés :** Concept, cahier des charges, intégration, environnement extrême.

Cette session a permis de présenter cinq nouvelles méthodes de mesures, déjà validées ou en cours de perfectionnement, ou à l'état purement conceptuel et dont le principe pourrait s'étendre au-delà des intérêts scientifiques des porteurs actuels.

- Les capteurs génomiques, rêve ou réalité? / Fabrice Not (ID2M)
- Capteurs géophysiques basés sur un interféromètre Fabry-Pérot / Pascal Bernard - Jean Chéry (Geoscience Montpellier)
- Approches pour des mesures denses du champ d'onde sismique / Jérôme Vergne (IPGS)
- Capteurs environnementaux adaptés aux milieux souterrains : développements et verrous / Gaël Monvoisin (GEOPS)
- ImSPOC : concept d'imageur hyperspectral miniature et versatile pour les sciences de l'environnement / Silvère Gousset (IPAG)

## DÉVELOPPEMENT

**Mots clés :** Miniaturisation, intégration, low-cost, environnement extrême.

Cette session a permis de présenter sept récents développements instrumentaux, allant du prélèvement à la mesure *in situ*. Un intérêt particulier est porté à l'apport de ces développements vis à vis des techniques classiques de référence, en termes de précision, de robustesse, de coût, de facilité de déploiement ou pour les nouveaux outils en termes d'apport aux domaines de recherche concernés.

- TRACESENSE : Système de pré concentration pour le mercure dans les eaux naturelles / David Point (LAAS)
- DEAFS : un multi-préleveur autonome et séquencé de fluides hydrothermaux de haute température (~300°C) en milieu extrême / Valérie Chavagnac (GET)
- RFID : surveillance de glissements de terrain et avalanches / Eric Larose (ISTERRE)
- Les développements de capteurs environnementaux au LETI / Pierre Labeye (LETI-DOPT)
- Développement/miniaturisation de capteurs innovants pour la mesure de gaz à effet de serre / Lilian Joly (GSMA)
- Développements techno d'un observatoire (O-ZNS) pour la maîtrise des transferts en Zone Non Saturée (aquifère-atm.) / Arnaud Isch (ISTO)

- KARST VOYAGER : Développement d'une sonde autonome pour la cartographie des drains karstiques / Séverin Pistre (HSM)

Une attention a été portée aux nécessités d'étalonnage et de reproductibilité des mesures. La table ronde consécutive a permis d'échanger collectivement sur la façon dont ces développements instrumentaux ont été conduits (modes de financement, temps de développement, collaborations inter-instituts) et sur des recommandations qui pourraient permettre de faciliter et d'accélérer ces développements.

Les échanges à l'issue de la séance plénière ont fait ressortir les questionnements suivants ou mis en évidence certains besoins :

- La mesure en milieu gazeux d'espèce chimique semble plus structurée et avancée qu'en milieu aquatique, avec la plupart du temps l'utilisation de techniques optiques (imageurs, spectroscopie proche ou moyen infrarouge).
- Problématique des seuils de sensibilité requis selon le milieu (cas du marin océanique très exigeant) et impact des normes de mesure de certains paramètres dans certains milieux (qualité de l'eau) qui contraignent les besoins de précision demandés aux capteurs (en plus ou en moins).
- Signification du terme « low cost » Ce pourrait être 6000€ pour certains types de capteurs et 500€ pour d'autres ! C'est une question de référence à l'état de l'art et de ressources. Les sciences participatives (exemples de la mesure des particules dans l'air) requièrent elles du « vrai low cost » pouvant être facilement diffusé et utilisé.
- Il a été relevé un besoin de mutualisation de solutions pour certaines fonctions génériques (gestion énergie, data loggers) qui permettent aux développeurs de se concentrer sur la mesure.
- Le développement de capteurs requiert le partage de ressources et de compétences (DT INSU) et labos => identification des compétences, réseaux métiers à faire émerger (rapprocher les chercheurs des réseaux métiers). Nécessité de « Banques de savoir-faire partagées ». Une meilleure visibilité de « qui fait quoi » sur le plan national permettrait également de répondre plus collectivement aux appels à projets et augmenter les chances de réussite.
- Utilité des Fablab, de services partagés de tests instrumentaux
- Problématique de la transmission des données, technique, bande passante, pré-traitements, intelligence embarquée, stratégie de stockage (tout/traité), coûts (marchés négociés)
- L'intelligence embarquée permet d'aller vers la modification automatique de la mission pour certaines applications autonomes. Elle permet également un traitement amont des données en vue de limiter les volumes transmis, point

critique sur les systèmes autonomes.

- Problématique de l'impact environnemental des capteurs, anticiper les futures normes, analyse du cycle de vie des capteurs (besoin d'expertise au CNRS), analyse de l'impact sociétal. L'initiative Labos 1.5 pourrait apporter un éclairage.
- Plusieurs questionnements tournant autour de l'éthique. Ex : choix de partenaires industriels ayant un fort impact sur l'environnement, avec 2 points de vues exprimés : on peut induire un changement de pratique et donc juger de façon positive le partenariat, mais on peut également servir de caution (*greenwashing*). Il n'est pas possible de mettre en place une règle éthique universelle à l'échelle du CNRS et il appartient aux acteurs de se poser les bonnes questions.
- Besoin exprimé de plus de liens avec les SHS, sur les aspects éthiques, mais également sciences participatives pour lesquelles les capteurs *low-cost* et/ou *low-tech* sont bien adaptés.
- Problématique du paradoxe lié à la demande de valorisation par rapport aux bénéfices de l'open source. Selon l'ampleur et la complexité du développement technologique, le partenariat avec le bon industriel peut être un plus.

## UTILISATION

**Mots clés :** Pollution de l'air, pollution de l'eau, observation, infrastructure, interdisciplinarité.

9 présentations plénières :

- Le mini-compteur d'aérosols LOAC pour l'étude des particules fines au sol et sous ballons / J.B. Renard (LPC2E)
- Le réseau de capteurs Apolline pour l'étude de la qualité de l'air et l'évaluation de l'exposition individuelle / S. Crumeyrolle (LOA)
- Photomètre automatique embarqué et couplage avec micro-lidar compact pour la mesure des aérosols / P. Goloub (LOA)
- La plateforme d'analyse SIRTA (<https://sirta.ipsl.fr>) / V. Gros (LSCE)
- Approche intégrée de la mesure des gaz dissous (par MIMS) à interface air-eau / T. Labasque (Geosciences Rennes)
- PAMELI : un drone marin multidisciplinaire pour l'étude du littoral / V. Ballu (LIENSs)
- Analyseurs chimiques *in situ* CHEMINI pour le dosage des sels nutritifs, du fer et composés soufrés / A. Laes (IFREMER)
- Quel rôle pour les capteurs *low-cost* de CO<sub>2</sub> en milieu urbain ? / M. Ramonet (LSCE)
- Instrumentation Lidar pour l'étude de l'atmosphère / J.-F. Mariscal (LATMOS)

La session a permis de considérer l'intérêt des nouveaux capteurs environnementaux pour les différentes thématiques d'observations du CNRS-INSU. Les unités INSU sont bien intégrées dans les programmes internationaux d'observation avec des participations importantes dans la plupart des infrastructures européennes d'observation de l'environnement (ICOS, ACTRIS, Euro-ARGO, EMSO-France, OZCAR/e-LTER, RESIF/EPOS...). Des développements instrumentaux fondés sur des techniques optiques (compteurs de particules, lidar,

spectrophotomètres) ou électrochimiques sont réalisés pour la mesure des aérosols et polluants atmosphériques ainsi que pour la mesure des paramètres chimiques en milieu liquide. Les présentations ont évoqué la complémentarité des nouveaux capteurs, en particulier les « mini-capteurs » en pleine expansion, avec les instruments traditionnels et leur potentiel d'utilisation dans les infrastructures d'observation, posant ainsi la question de leur intégration dans les processus d'étalonnage. L'apport des capteurs utilisés dans les réseaux de science participative et les enjeux de ces études ont également été évoqués.

Les échanges à l'issue de la séance plénière ont fait ressortir les points suivants :

- Nécessité du croisement des disciplines, du renforcement des liens inter-instituts, de l'ouverture vers les industriels
  - Importance de l'interdisciplinarité pour l'étude de la qualité de l'air (santé, urbanismes, SHS)
  - Interaction avec autres instituts CNRS sur les problématiques radar-lidar (cellule transverse ?)
  - Développement nouveaux matériaux pour capteurs, lien avec plateforme type RENATECH)
  - Mieux communiquer au sein des communautés, nécessité de rencontres multidisciplinaires élargies à d'autres instituts CNRS et aux industriels.
  - Ne pas négliger les problèmes de confidentialité et d'éthique lors de collaboration avec les industriels.
  - Sciences participatives : associer les participants pour définir les bonnes pratiques
- Nouveaux capteurs et infrastructures
  - Partager les bonnes pratiques entre capteurs eau/océano et capteurs atmosphériques.
  - Nécessité de développement de capteurs bio (ADN-environnemental), mesures micro-organismes : interaction avec INSB et milieu médical et industriel
  - Mieux faire connaître les exercices d'inter-comparaison internationaux de la communauté des développeurs (Question essentielle de la calibration des capteurs)
  - Améliorer le lien avec les infrastructures de données, notamment pour les métadonnées.
- Visibilité des compétences
  - Élaborer un catalogue des capteurs développés pour la mesure d'une grandeur physique donnée.
  - Améliorer la visibilité des plateformes de l'INSU : accès aux informations par différentes entrées
  - Tendre vers une utilisation plus fréquente des pôles de compétitivité
- Moyens et personnels
  - Les moyens alloués par la MITI sont trop faibles pour permettre le développement de capteurs
  - Penser à l'inter-équipe et l'inter-labo : par exemple, un ITA d'un labo pourrait mener une « mission technique ciblée » d'une semaine ou deux dans un autre labo (le réseau « métier » est trop large pour ce type d'action).
  - Imaginer des co-développements (capteurs, logiciels embarqués...) à l'échelle nationale en modèle open-source.
  - Prise de risque non prise en compte dans les projets ANR Mieux identifier l'INSU dans les CID CNRS.

## 2. Moyens

### ORGANISATION RH POUR OPTIMISER LES MOYENS

- Impacts sur les métiers
  - Maintien des compétences techniques essentielle avec une granulométrie locale et nationale
  - Hétérogénéité au sein de l'INSU des moyens techniques à l'intérieur des laboratoires. Comment mutualiser quand le nombre d'ITA est de plus en plus faible ?
  - Nécessité d'une cartographie nationale des compétences, des métiers, des thématiques de recherche. Qui fait quoi et où ?
  - Interconnexion des réseaux de métiers. Ex. Opticiens/mécaniciens
  - Améliorer les interactions entre les instituts et nécessité de recruter des technologues à l'INSU
- Face aux difficultés des établissements Publics à obtenir des postes, rôle des industriels ?
  - LabCom (structures communes de recherche CNRS/entreprises)
  - Possibilité de détachement ingénieur/technicien Entreprises => laboratoires
  - Assistance technique peut être à trouver dans les PME
  - Difficulté avec les entreprises au niveau du SAV
- Formation incluant participation des industriels à la formation ?
  - Inclure les industriels dans les masters + système de parainage
  - Important d'enseigner comment on fabrique un instrument ?
  - Manque une cartographie des formations. Par ex., où est enseignée l'instrumentation en océanographie ?
- Quelques conclusions / remarques :
  - Nécessité de trouver des PME capables de dupliquer des capteurs (micro-niches).
  - Nécessité d'être capable de fabriquer un capteur rapidement (via des FabLab)
  - Nécessité d'impliquer les industriels dès que possible
  - Nécessité d'embauche d'ITA (érosion significative des supports techniques au sein des laboratoires) mais également de chercheurs pour le développement de capteurs.
  - Au sujet de la DT-INSU : Le mode de fonctionnement ne permet pas assez d'interactivité. Peu de contact direct par manque de visibilité. Suggestions : Permettre aux agents de la DT INSU d'aller vers les laboratoires pour partager leur expertise, accompagner ; aider à l'établissement de cahier des charges (plutôt que « faire ») ; Inclure les agents de la DT INSU sur un hackathon<sup>1</sup> instrumentation INSU

### MOYENS LABOS/ INDUSTRIELS ET LEUR OUVERTURE

- Réalisation (Atelier mécanique / Fab lab / Électronique)
  - Catalogue d'expertise en local (labos, OSU) et DT INSU
  - Soutien DT INSU dans la maturation du projet et l'évaluation de la faisabilité. Rôle de bureau d'étude.
  - Échanges et accès aux plateaux techniques des lycées techniques
  - Demande d'aide et de mutualisation pour la réalisation des fonctionnalités génériques des capteurs (transmission et gestion des données)
  - Problème des prestations électroniques trop chères en France
  - Espaces de co-working associant des industriels pour échanger les idées
- Acquisition de nouveaux outils : Fabrication additive
  - Échanges indispensables pour accès à l'information sur la localisation de ces moyens.
  - Réalisation des prototypes en labo puis assistance (DT, industriels) pour la duplication.
- Infrastructures (IR/TGIR, SNO, plateformes...)
  - Différence de maturité entre les infrastructures (ICOS vs ILICO)
  - Le bon niveau pour l'ajout de nouveau capteurs est le SNO mais certaines IR peuvent financer de la R&D
  - Plateformes : problème de maintenance sur le long terme ; moyens RH
  - Les services des IR doivent être mis en avant.
  - Les IR peuvent servir de label aux nouveaux capteurs
- Ouverture des moyens d'essais respectifs indus / labos et plateformes, engins, vecteurs légers (drones...)
  - Nécessité d'une meilleure information sur les moyens d'essais disponibles : possibilité de courtes vidéos décrivant les plateformes et moyens d'essais sur le site INSU
  - Meilleur accès aux expertises disponibles dans les labos
  - Catalogue des moyens d'essais chez les industriels via les SATT (Service)
  - Catalogue des startups ayant développé des capteurs environnementaux

### LIENS ENTREPRISES/MOYENS FINANCIERS ET HUMAINS / IMPACTS SUR LES MÉTIERS

- Rôle des laboratoires : Inventer et non Dupliquer
  - Compétences différentes entre labos et industriels/complémentarité
  - Les laboratoires apportent la caution de la mesure aux industriels

1- Le mot hackathon désigne un événement durant lequel des groupes de développeurs (initialement en informatique mais par extension plus largement) se réunissent pendant une période de temps donnée afin de travailler sur projets de manière collaborative. C'est un processus créatif axés sur des propositions de solutions innovantes ou la conception de nouvelles applications.

- Identifier des industriels pour la réalisation de séries/ des PME, Start-ups, grands groupes établis et engagés (marché de niches) assez tôt dans les processus projet: Rôle des SATT (consommateur de temps)? Rôle des pôles de compétitivité dans cette identification et mise en contact? Intérêt d'un détachement de personnel CNRS dans des pôles de compétitivité?
- Méthodologie de travail avec les industriels pour dupliquer (préséries)
  - Quelle forme de collaboration (prestations ou recherches partenariales)?
  - Intervention des industriels sur une brique ou sur toute la chaîne instrumentale?
  - Importance de l'établissement du cahier des charges: Cahier des charges d'une invention est différent entre labos et industriels; Traduction d'un développement instrumental en cahier des charges différente si la présérie est envisagée dès l'idée, si le développement est prévu pour la paillasse ou le terrain; Timing différent entre industriels et labos; Intérêt de former les doctorants pour un langage commun avec les industriels; Relations avec des industriels locaux privilégiées, liées aux conditions d'appels d'offre: Région, FUI, FEDER sur des 3-4 ans parfois incompatibles pour des développement industriel (~10 ans); Peu d'échanges à l'Europe, à l'international
  - Transfert techno/commercialisation ou Open source
  - Pas vraiment de consensus au niveau de la communauté: Besoin d'une stratégie commune partagée? Quel modèle économique pertinent? Problème éthique soulevé sur la nécessité de cadrer l'intervention des industriels;
  - Transfert techno/commercialisation: Très peu évoqué;
  - Nécessité de relations bien définies entre les industriels pour la duplication et ceux pour la commercialisation, si différents;
  - Quelques cas évoqués de travail de pair exceptionnel entre labos et industriels: De l'importance des outils LabCom, CIFRE, Chaires industrielles, Equipex pour le transfert techno/la commercialisation
- Collaboration inter-organismes
  - Les synergies entre compétences sont des clés essentielles au montage des projets, notamment pour assurer la solidité du projet global par une identification complète des besoins d'expertise. La complémentarité entre partenaires peut être une richesse à exploiter (par ex techno/applicatif, ou labos/PME/grands groupes)
  - Anticiper l'articulation entre les partenaires de différents organismes très en amont lors des montages projet au moment des phases initiales de discussion. L'identification des contributions respectives sont à travailler suffisamment en amont, y compris pour compléter le consortium projet.
  - À noter lors des sessions l'expression d'un besoin fort de

collaboration inter-organisme pour le développement de capteurs génomiques en océano.

- Partage et coordination des parcs instrumentés entre les organismes, avec des modalités d'accès suffisamment ouvertes, comme peut l'être le Parc National Océanographique CNRS hébergé à la DT INSU.

## MONTAGE PROJET ET MODES DE FINANCEMENTS

- Montage projet
  - Besoin de support pour le montage de projets transverses: Forum capteurs (échanges technos/applications/moyens) pour faciliter le montage de projets, et obtenir une meilleure visibilité sur les acteurs nationaux; Lobbying pour initier les appels à projets transverses, que ça soit au niveau national comme au niveau européen (ex: FET Open).
  - Besoin d'une cartographie des guichets pour mieux identifier les sources de financement les plus adaptées à son projet, en fonction de: Durée; Niveaux de TRL; Budgets requis (RH, équipement, fonctionnement, missions...); Envergure collaboration (nb équipes, nb domaine, nb applications etc.). Ne pas se limiter aux quelques guichets connus et besoin de moyens pour trouver rapidement les guichets qui marchent bien, et leurs applicabilités.
  - Les petits programmes (DEFI actuels MITI) sont adaptés pour faire émerger de nouvelles idées, mettre le pied à l'étrier et aller ensuite vers des montages plus ambitieux, toutefois les montant et la durée possible des projets sont trop restreints au regard des objectifs à atteindre.
  - Quels sont les guichets ou les montages permettant d'atteindre des objectifs ambitieux avec un nombre de participants et d'applications important?
  - Quel est le bon niveau (TRL, ampleur projet) pour candidater à l'ANR et à l'ERC. Besoin de conseil de ce point de vue pour les montages projet.
- Participation commune à des projets européens:
  - Réflexion autour de la notion de « Déclaration d'intention »: faciliter la mise en relation des scientifiques intéressés par un AAP en amont pour candidater de façon collective = augmentation des chances de réussite. Exemple récent et contemporain de l'atelier: le montage du PIA3 Terra Forma (Observatoire des socio-écosystèmes à l'ère de l'Anthropocène), rassemblant 38 unités de recherche, et dont le montage a rassemblé des partenaires INEE, INSU et INSIS entre autres.
  - Difficulté à visualiser l'ensemble des financements adaptés au niveau EU: besoin d'infos synthétiques pour identifier les appels: calendrier, budgets...
  - Certaines difficultés à identifier les compétences et les acteurs hors de sa communauté scientifique.
  - Projets EU jugés trop lourds en montage puis justifica-

tion : besoin de soutien sur ces 2 phases (souvent appel à des cabinets spécialisés au coût important). Constat que les cabinets rédigent des propositions très différentes de celles faites par les scientifiques (et avec un meilleur taux de succès).

- Action de lobbying à l'Europe jugée insuffisante (rédaction des appels, présence dans les instances/commissions...), Il serait utile que nos communautés soient plus présentes dans les comités d'évaluation.
- Modes de financement et subventions :
  - Les appels d'offres technologiques attribuent souvent des budgets dont les montants ne sont pas à la hauteur des enjeux.
  - Temps de développements longs (10 ans typ.) vs Temps projets « courts » (3 à 5 ans).

- Sources de financements difficiles à trouver pour certains projets où le lien avec la question scientifique est indirect.
- Désintérêt significatif vis-à-vis des financements ANR: prise de risque peu soutenue, manque de cohérence d'une année sur l'autre lors de re-soumissions.
- Difficultés à identifier la source de financement la plus adaptée.
- Réflexion sur une façon de centraliser les appels et sur des critères simples permettant de faciliter leur sélection en fonction de son projet (ex: durée, montants typiques, TRL, RH/pas de RH, gestion simple/complexe...).
- RH: difficiles à financer et surtout à pérenniser, se traduisant par une perte de savoir-faire et de compétences. La question est d'autant plus cruciale du fait que les développements ambitieux se font sur des temps longs (voir ci-dessus).

## 3. Recommandations

### BESOINS TECHNOLOGIQUES DE BASE

Les discussions lors de l'atelier font apparaître quelques besoins technologiques pointus :

- Imagerie embarquée
- Micro-fluidique
- Bio-capteurs: il est identifié qu'une collaboration inter domaine/organisme est à organiser (ex. très prospectif de la détection d'ADN)
- Intelligence embarquée, capteurs intelligents
- Capacité de gestion de forts débits de données
- Calcul de paramètres évolués
- Capacités de décision à bord, pré-traitement des données

Des besoins plus génériques sont également remontés :

- Systèmes de communication
- Production / stockage / gestion de l'énergie
- Production de composants ou systèmes: cartes électroniques par exemple.

La gestion de la maturité technologique doit être suivie, pour optimiser la montée en TRL<sup>1</sup>. Un aspect central est d'être capable de passer de la paillasse (typiquement dans un labo INSIS) à la mesure pleinement opérationnelle *in situ* (INSU au sens large) pour la production de données scientifiques et d'observation.

Un suivi des évolutions de versions technologiques est également essentiel au déroulement des projets qui utiliseront ces capteurs. Dans ce processus d'évolution de version, il peut être prudent de ne pas chercher dès les premières étapes un

composant idéal, en particulier les besoins de duplication ou production ultérieures doivent être considérés dès la conception initiale.

Une synergie entre domaines INSU a été suggérée pour tirer profit d'une expérience de l'un vers l'autre (réalisation, déploiement et calibration) par exemple du domaine atmosphérique vers le domaine océanique potentiellement beaucoup plus contraignant.

L'intérêt de l'utilisation de COTS<sup>2</sup> a été discuté et mérite d'être analysé plus en détail: quel potentiel, quelles précautions d'emploi, quels besoins de validation et calibration. La généralisation de l'utilisation de certains COTS pourrait nécessiter la mise en place d'une ou plusieurs plateformes de caractérisation.

Enfin il a été souligné la nécessité de se doter de moyens de financement plus conséquents pour les développements technologiques à bas TRL.

### BESOINS EN DÉVELOPPEMENTS ET INGÉNIERIE GÉNÉRIQUE

Les discussions lors de l'atelier soulignent le besoin impérieux de moyens humains techniques à deux niveaux :

- En tout premier lieu par le recrutement au sein des laboratoires INSU de chercheurs instrumentalistes et technologues. Une attention forte doit être portée pour permettre des postes inter-institut (ou via les CDI dont le fonctionnement pourrait être revisité).

1- Technology Readiness Level

2- Components On The Shelves

- D'une part au plus proche des équipes de recherche, dans les laboratoires (expression du besoin, compréhension du besoin scientifique, implication ultérieure pour la continuité des projets...). Ceci est particulièrement vrai pour la conception de nouveaux capteurs.
- D'autre part dans des équipes techniques de dimension suffisante pour assurer un travail d'étude de réalisation et de mise en œuvre dans son ensemble, en bénéficiant de l'ensemble des expertises requises. Ce peut être à la DT, dans des services techniques de proximité dans les OSU, ou au sein de grands laboratoires ayant une expertise instrumentale forte.

Pour certains domaines l'appui d'une équipe technique extérieure est indispensable pour soutenir l'activité instrumentale pour l'observation (faible expérience technique, spectre d'expertises nécessaires trop large, introduction de nouvelles techniques pour les domaines, etc.).

Le besoin de capacité de réalisation en proximité a été souligné, notamment pour la mécanique. Des solutions sont à chercher au plus proche des unités pouvant constituer des solutions intermédiaires aux moyens nationaux de la DT-INSU :

- plateformes technologiques,
- fablabs,
- moyens de réalisation mécaniques soustractifs (centres d'usinage) et additifs (impression 3D),
- plateformes des lycées professionnels et écoles d'ingénieurs.

De façon générale il est nécessaire de disposer de capacité de réalisation de prototypes instrumentaux sur toute la chaîne : identification précise du besoin, cahier des charges, conception générale et détaillées, réalisation, AIT<sup>3</sup>. Finaliser un système pour le rendre opérationnel est très difficile (montée en TRL). La compétence consolidée pour le prototype doit permettre de gagner en efficacité pour optimiser les délais entre l'idée instrumentale et l'opération *in situ*. Nous devons remettre à jour nos compétences de développements en tenant compte des nouvelles techniques de conception et réalisation qui permettent de réduire très significativement les temps de développement, qui deviennent trop longs comparées aux méthodes qui apparaissent dans le domaine industriel innovant.

En termes de production instrumentale la nécessité de disposer d'instruments en petites ou moyennes séries pour nos moyens d'observation constitue un besoin croissant pour les moyens d'observation. Ce besoin mériterait une analyse plus fine de la façon de procéder, particulièrement sur les points suivants :

- Quelles capacités de conception plus approfondies pour tenir compte au plus tôt du besoin de duplication quitte à y investir plus de temps, de moyens, éventuellement des budgets plus conséquents ;
- Se doter de bonnes capacités de prototypage : concepts, mécanique, électronique, contrôle commande. Il convient d'identifier les unités capables de mener ces travaux de

prototypage (DT, OSU, laboratoires instrumentaux). Peut-être est-il illusoire de vouloir se contenter de moyens de coin de table pour ce type de développements au risque de perte de temps (et de dispersion de moyens humains) ;

- Capacités de production en série en interne dans un ou plusieurs unités INSU, ou sur des plateformes d'autres instituts (par exemple RENATECH), est-ce réaliste ?
- Capacités de superviser le travail de sous-traitance : cahier des charges, passation et suivi de marché, recette des composants, suivi en maintenance, etc.
- Identification d'entreprises partenaires capables de produire dans la durée des équipements en petites et moyennes séries qui répondent à nos besoins (base de donnée d'adresses d'entreprises à entretenir).

Dans tous les cas il est souligné la nécessité de savoir anticiper la gestion de l'instrument et son opération après réalisation, incluant les coûts d'opération et de maintenance.

Enfin un dernier besoin a émergé de se doter et de rendre disponible assez largement des moyens de métrologie et de calibration-intercalibration. Pour ce faire, il faut regarder comment on peut tirer profit des moyens développés dans le cadre de certaines IR/TGIR (par exemple ICOS pour les capteurs d'aérosols ou de CO<sub>2</sub>). Faut-il se doter plus largement de tels moyens de métrologie : océanographiques, spectroscopie, etc.

## NÉCESSITÉ D'INVENTAIRES / IDENTIFIER LES MOYENS

Un fort besoin d'inventaires au sein de l'INSU a été identifié, qui pourraient par exemple être constitués et gérés en local par les OSU, et relayés nationalement auprès de l'INSU :

- Compétences et expertises ;
- Équipements, parfois disponibles via des plateformes, ou des Infrastructures de recherche (IR/TGIR) : moyens de caractérisation, de tests et de réalisation ;
- Composants spécifiques stockés en laboratoire pouvant être mis à disposition (stocks de grands projets spatiaux par exemple, obligés d'approvisionner en plus grand nombre que nécessaire) ;
- Technologies disponibles : capteurs et briques de base, et fonction connexes (communication, énergie, Intelligence à bord).

Il est suggéré de maintenir un site internet pour relayer ces informations. Quelques vidéos pourraient présenter certains moyens emblématiques (plateformes ou infrastructures).

## AEI : UNE RENCONTRE ESSENTIELLE POUR LES IT ET CHERCHEURS À L'INSU

Les AEI (Ateliers Expérimentation et Instrumentation portés par l'INSU) bisannuelles sont l'occasion de faire émerger de nouvelles idées, de nouvelles collaborations. Il est essentiel de maintenir d'une part le périmètre « instrumentation / science associée » et d'autre part le format permettant des rencontres entre ITA et chercheurs sur les préoccupations instrumentales de base.

3- Assembly Integration and Tests

Il ressort de l'atelier un besoin de renforcer l'ampleur et d'élargir le périmètre des AEI. Plusieurs suggestions ressortent :

- Continuer à prévoir des ateliers thématiques sur des besoins ciblés, y compris visant du co-développement ;
- Faut-il de façon systématique associer TECHMAR (réseau sur les technologies marines) par une session dédiée ?
- Les AEI pourraient être l'occasion d'une session « forum d'échanges pour montage de projets » (mise en présence d'acteurs complémentaires applications/technologies) pour initier de nouvelles collaborations, mais également pour diffuser l'information sur l'existant (notamment diffusion des inventaires INSU).
- Il est important de continuer à ouvrir plus largement les AEI, notamment aux autres instituts du CNRS. Les AEI peuvent être un cadre pour une session de type Hackathon.

## RÉSEAUX ET TRAVAIL TRANSVERSE

La nécessité/volonté de maintenir des actions de réseautage a été fortement exprimée pour maintenir un lien humain/vissuel entre les acteurs des différentes unités.

Un objectif important est d'encourager les échanges transversaux notamment pour aider à mettre le pied à l'étrier de nouveaux acteurs et pour accompagner l'accès vers de nouveaux guichets.

Les bénéfiques des « réseaux métier » ont été soulignés :

- Fort besoin de mise en réseau et d'interconnecter les réseaux ;
- Besoins d'accès aux réseaux métier de la MITI-CNRS ou autres au moins en mode consultatif (échanges d'information et base de données) ;
- Nécessité de créer un nouveau réseau national transverse dédié aux développements et à l'utilisation de capteurs sur le terrain. Ce réseau doit être ouvert plus largement que l'INSU, même s'il est porté uniquement par l'INSU.

Par ailleurs l'atelier a abordé à plusieurs reprises le besoin de revoir l'orientation des sections pour le support à l'instrumentation et en particulier le contour des sections interdisciplinaires (CID 54 par exemple).

Un travail de réseautage sur d'autres périmètres doit être considéré notamment auprès des pôles de compétitivité (Pôle mer méditerranée, Minalogic...), notamment pour faire connaître nos applications et compétences, par exemple auprès des industriels, mais aussi pour initier de nouvelles collaborations.

Enfin il convient de mener des investigations sur le potentiel de moyens extérieurs à l'INSU : potentiel des écoles d'ingénieurs, fablabs, hackathon, projets étudiants d'envergure (mode Centres Spatiaux Universitaires). De tels outils sont occasions de porter d'autres regards, en particulier via la diversité des intervenants. Une telle attention est un bon terrain pour l'innovation.

## SUPPORT ESCOMPTÉ DE LA DT

La proximité entre la DT et les laboratoires est jugée essentielle. Il ressort des échanges que les services de la DT sont trop peu connus et diffusés. Des visites systématiques d'experts de la DT sur les sites INSU seraient nécessaires, pour identifier au plus tôt les besoins et les problématiques instrumentales.

Les besoins les plus forts qui ressortent lors des ateliers sont les suivants :

- Support au prototypage.
- Réalisation de petites séries. Il faut analyser l'opportunité de le faire en labo ou de sous-traiter en entreprise.
- Conseil et support via des experts. Pourrait aussi faire intervenir des experts de labos INSU, ou d'écoles d'ingénieurs :
  - en amont pour le montage projet, même si la DT n'est pas impliquée ultérieurement.
  - pour l'établissement de cahier de charges
  - pour l'identification des verrous et plus-values
  - pour l'aide à la prise de risques, notamment pour les montages de prototypes
  - Contribution à des séances de brainstorming
- Les équipes des laboratoires souhaitent compter sur la DT pour mener une veille sur des technologies et des méthodes de développement.

Il ressort des travaux de ce défi qu'une réflexion reste à mener sur le fonctionnement et les missions de la DT au service des unités de l'INSU pour adresser au mieux leurs besoins. Cette réflexion doit inclure une forte vigilance sur le maintien et l'ajout de compétences essentielles pour l'INSU, tout en veillant à éviter une dispersion des moyens humains disponibles à la DT, autant en termes de compétences que de disponibilité.

## DONNÉES

Même si le sujet est plutôt abordé lors d'autres défis de la prospective INSU, le sujet est revenu à plusieurs reprises. Le point essentiel qui ressort est le très fort accroissement du volume de données produites par les systèmes instrumentaux, ou instruments fonctionnant en réseau. Un point d'attention concerne le choix des données à archiver effectivement compte tenu de cette croissance très significative de la quantité de données produite.

Il ressort un très fort besoin de savoir traiter des données très hétérogènes provenant de capteurs différents, autant par le type de mesures que par le type d'instruments :

- Multi-paramètres ;
- Multi capteurs ;
- Multi fournisseurs (manips, équipements, équipes, science participative).

Il se pose en conséquence un réel problème de stockage et curation des données. De ce point de vue les IR/TGIR sont amenées à jouer un rôle central pour la définition de la stratégie à adopter, soit au cas par cas pour chaque programme scientifique, soit de façon plus globale. Le lien avec Data

Terra est essentiel pour assurer ces fonctions à différents niveaux. Le rôle des OSU est également central pour la curation des données non prises en charge dans les infrastructures nationales.

Il ressort des discussion une recommandation de travailler sur la stratégie de gestion de données. Une façon de procéder peut être de mobiliser le réseau SIST<sup>4</sup> sur ce sujet, via ses forums ou ses formations (ANF), les questions à traiter sont les suivantes :

- Stratégie de stockage/traitement/transmission
- Capacité de stockage à bord
- Traitement à bord : compression / extraction de paramètres signifiants / décimation-sélection
- Besoin de calcul temps réel à bord pour le besoin instrumental, notamment le contrôle commande
- Stratégie de transmission (temps réel / récupération ultérieure)

## RELATIONS INDUSTRIELLES

En note préliminaire, une attention doit être portée à la diversité des partenaires :

- Objectifs différents entre labos/organismes/industrie. Par exemple pour l'application « mesures analytiques de l'eau » : industriels = qualité de l'eau et labos = biodiversité ;
- Disparité des intervenants (public / privé, ou EPIC/EPST) peut compliquer le dialogue ;
- Essentiel de garder à l'esprit nos objectifs et mission CNRS. Ce point inclut les éventuelles contraintes éthiques pour des collaborations avec des partenaires ayant des objectifs contradictoires aux nôtres.

Dès le début des projets de développement industriel il est essentiel de réfléchir aux répercussions économiques potentielles et d'inclure les cellules de valorisation, et d'éventuels partenaires industriels, même en qualité de consultants. Les PME avec interlocuteurs issus du milieu académique connaissant notre milieu et nos contraintes sont un réel plus pour les collaborations. À l'inverse, il est également précieux de disposer d'agents ayant une expérience industrielle.

Une recommandation ressort d'entretenir et de rendre disponible à la communauté, un inventaire des entreprises collaborant avec nos unités, incluant :

- Le type de prestations (sous-traitance fournie par l'entreprise, sous-traitance fournie à l'entreprise, collaboration, partenaires de consortium)
- Les expertises et domaines couvert
- Identification de capacités à produire de petites séries d'instruments
- Les connaissances partagées (Propriété Intellectuelle).

## RÉCAPITULATIF DES RECOMMANDATIONS

Cette section récapitule les recommandations principales du défi qui sont explicitées plus en détail dans le texte :

**1. TECHNOLOGIES DE BASES :** Évaluer le potentiel des composants disponibles sur Étagère (COTS) produits à grande série, quelles utilisations possibles, quelles précautions, quelles validations/calibration prévoir.

**2. INGÉNIERIE GÉNÉRIQUE ET MOYENS HUMAINS.**

- Une attention doit être apportée au recrutement de personnels instrumentalistes et technologues (chercheurs et IT). Le besoin concerne les laboratoires et les services communs (DT, OSU et/ou UMS).
- Pour la réalisation de petites et moyennes séries d'instruments d'observation, une analyse de la méthodologie à adopter et moyens requis doit être réalisée.
- A l'échelle de l'INSU se doter et rendre disponible assez largement des moyens de métrologie et de calibration-intercalibration.

**3. INVENTAIRE MOYENS :** Constituer et entretenir au niveau de l'INSU un inventaire des moyens disponibles dans les unités, incluant expertise, équipements, plateformes et composants. De tels inventaires doivent s'appuyer sur le relais des OSU.

**4. RENFORCER L'AMPLEUR ET ÉLARGIR LE PÉRIMÈTRE DES AEI (Ateliers Expérimentation et Instrumentation)** que l'INSU organise conjointement avec ses partenaires tous les deux ans (IFREMER, Météo France, SHOM, IRD notamment).

**5. RÉSEAU CAPTEUR :** Nécessité de créer un nouveau réseau national transverse dédié aux développements et à l'utilisation de capteurs sur le terrain. Ce réseau doit être ouvert plus largement que l'INSU, même s'il est porté uniquement par l'INSU.

**6. LA DT AU SERVICE DES UNITÉS INSU :** Le rôle et l'implication de la DT auprès des laboratoires sont à ajuster. Un fort besoin de conseil est exprimé. Il est suggéré que des experts de la DT prennent du temps pour visiter les unités.

**7. TRAVAILLER SUR LA STRATÉGIE DE GESTION DE DONNÉES** en lien avec les OSU et les infrastructures de données nationales. Cette stratégie doit permettre de tenir compte de la forte hétérogénéité des données.

**8. ENTREtenir ET Rendre Disponible à la Communauté, un inventaire documenté des entreprises collaborant avec nos unités.**

4- <https://sist.cnrs.fr>

# Défi 16

## Instrumentation en milieux extrêmes

**Conseil scientifique: Frédérique Auriol, Frédéric Foucher, Alain Dabas, Jacques Pelon, Roberto Grilli, Pierre Durand, Eric Defer, Pierre Coutris, Agnès Borbon, David Picard, Estelle Rose-Koga, Karim Kelfoun, Philippe Labazuy, Ali Bouhfid, Nathalie Huret, Christelle Rossin, Pierre Kern, Laurent Royer, David Sarramia, Christophe Delacourt, Lilian Joly, Carl Gojak, Valery Catoire**

Une meilleure compréhension du système Terre et de l'évolution de son environnement, et de notre système solaire, nécessite un suivi plus dense en espace et en temps, notamment dans les régions difficiles d'accès et dans les environnements les plus extrêmes. Aux échelles de temps courtes ou pour des mesures très locales, les systèmes satellitaires nécessitent encore d'être complétés par une instrumentation de surface dédiée.

Pour appréhender la complexité du système étudié au travers de ses différents compartiments et de leurs interactions, le défi technologique est de pouvoir disposer/développer des instrumentations novatrices et robustes vis-à-vis des conditions extrêmes rencontrées au sein de ces compartiments. Le déploiement et la mise en œuvre de ces instrumentations, au sein et à distance de ces milieux extrêmes ainsi que pour des expérimentations de laboratoire à même

de reproduire ces milieux, constituent également un défi logistique.

Les milieux extrêmes auxquels notre communauté est confrontée peuvent être définis par un, plusieurs ou la combinaison des paramètres et/ou conditions suivants :

- Paramètres d'état : haute et basse températures, haute et basse pressions, salinité, acidité ;
- Paramètres dynamiques : forts gradients, large gamme des paramètres d'état, non linéarité ;
- Conditions environnementales : vents, précipitations, foudre, nuages, cyclone, courants, pollution, particules chargées, rayonnement et inconnue ;
- Accessibilité de la mesure - milieu hostile : planétologie, zone polaire, zone éruptive, zone océanique lointaine, cavernes ;
- Durée de l'événement : très court, très long.



© CNES/ill./DUCROS David, 2020

# 1. Atouts, manques et besoins

## MESURES ET EXPÉRIMENTATION EN CONDITIONS EXTRÊMES

Les objectifs de la session reposaient sur les développements de nouveaux capteurs basés sur différentes technologies : spectroscopie optique (UV, Visible, IR, micro-onde) ou spectroscopie de masse pour caractériser les matériaux (gaz, liquide, solide), radiométrie, mesures de champs électromagnétiques, mesures acoustiques, mesures de conductivité électriques, mesures des gaz dissous dans l'eau, et leurs applications aux milieux extrêmes pour des mesures actives, passives, *in situ* et par télédétection.

4 présentations plénières (et 14 posters) ont illustré les problématiques :

- Développements autour du projet Subglacior, R. Grilli, IGE ;
- Expérimentation en laboratoire, A. Bouhifd, LMV ;
- Instrumentation sous-marine profonde, C. Gojak, DT-IN-SU ;
- Les contraintes instrumentales du spatial sur l'instrumentation et les capteurs, Y. Parot, IRAP.

Les présentations ont permis de mettre en avant l'expertise, mais aussi les points durs, sur l'instrumentation déployée en conditions :

- aéroportées (avion, ballon, drone...),
- polaires (sondes de forages innovantes, étude du pergélisol),
- océaniques (profileurs, instrumentation géophysique tractée ou déployée sur le fond),
- les développements pour l'astronomie, le spatial,
- les observations en volcanologie.

Les échanges lors de cette session ont mis en avant les manques et/ou besoins suivants :

- Développement instrumental :
  - Modes de financement actuels inadaptés au cycle de vie des capteurs et systèmes instrumentaux innovants existants (pérennisation-jouvence-démantèlement) ; hors équipements IR/TGIR
  - Besoin de connaissance et d'accès aux plateformes d'essais d'instrumentation en conditions réelles/extrêmes (CNRS et autres organismes)
  - Besoin de structuration de la veille technologique au niveau national

- Besoin de durcissement pour les milieux extrêmes des nouvelles technologies de laboratoire (miniaturisation, automatisation, fiabilisation...)
- Manque de stratégie commune de stock de composants et partage de leurs validations et tests (sources, détecteurs ou composants électroniques)
- Organisation du travail et ressources humaines: Nécessité de définir les besoins RH sur la durée globale des projets (développement-exploitation- démantèlement).
- Développement de nouvelles compétences:
  - Intelligence artificielle embarquée pour l'aide à la décision, l'automatisation de la mesure et le contrôle instrumental pour l'adaptation au milieu (mise en sécurité des équipements)
  - Traitement et qualification automatique des données
- Conditions d'accès et logistique sur les sites d'observation:
  - Besoin de technologie alternative pour le stockage et la récupération d'énergie (piles lithium/ difficultés de transport par avion/au coût de certification, certification IATA)
  - Difficultés récurrentes pour le transport et l'assurance des équipements (transport et durée de la mission de terrain) via l'unité ULISSE

### MINIATURISATION DE LA MESURE EMBARQUÉE POUR ÉCHANTILLONNAGE AUTONOME EN ENVIRONNEMENT EXTRÊME

Les objectifs de la session reposaient sur: le développement de briques instrumentales individuelles compactes, sobres en énergie; l'autonomie en énergie (nouvelles batteries, différentes technologies utilisées...); les bancs d'étalonnage ou de tests nécessaires pour ces instrumentations miniatures; les outils de simulation; les transferts de données; les contraintes de l'environnement sur le capteur incluant la durée d'utilisation (rayonnement, acides, oxydation en basse atmosphère, *fooling*, givrage si milieu polaire...), *low technology* (cf. défi 15).

5 présentations plénières ainsi que 3 posters accompagnés de présentations flash:

- Chromatographes embarqués sur mission spatiale, F. Stalport, LISA;
- Télédétection Active LiDAR en milieu extrême: développements et évolution, V. Mariage, LATMOS;
- Capteurs embarqués sous drone: Imagerie, échantillonnage et géophysique - des volcans à l'atmosphère, L. Gailler, LMV;
- La qualification de capteurs en milieu extrême, L. Cadiergues, CNES;

- Microorganism dynamics from ocean surface to bathypelagic realm, M. Denis, MOI.

Les présentations ont permis de mettre en avant diverses expertises, parfois pluridisciplinaires:

- Un échantillonnage miniaturisé, autonome et versatile;
- Des qualifications à divers environnements extrêmes: T, P, accélérations, radiations, CEM<sup>1</sup>, etc.;
- Des instrumentations à forte robustesse voire à bon niveau TRL, en raison d'une maintenance impossible ou très difficile;
- Une bonne connaissance des règles de sécurité (cf. drones), de transport de batteries, ou de gestion des déchets...;
- Une veille technologique certaine;
- Un opportunisme multi domaines.

Les manques et les besoins identifiés ont aussi été nombreux:

- Nécessité de financer la R&T;
- Recenser les bancs de test et calibration;
- Partager les compétences avec les experts d'autres unités;
- Créer un réseau de capteurs bas coût (résolution spatio-temporelle vs précision);
- Aider à résoudre le problème d'approvisionnement des composants obsolètes;
- Mettre en place des méthodes de gestion de projet pour identifier les problèmes au plus tôt (prototypage, tests unitaires...);
- Besoin de plus de simulations;
- Difficulté à réaliser des mini-séries;
- Faire accepter le risque d'échec.

### DRONES, BALLONS ET ROVERS (SESSION 3)

Les objectifs de la session couvraient différentes thématiques telles que la communication avec le drone, les vols ou parcours en formation ou en essaim, les vols ou parcours adaptatifs, les drones multiples indépendants ou non, la combinaison possible avec d'autres porteurs, les drones autonomes (drones sous-box), les améliorations nécessaires pour interfacer l'instrumentation par rapport à ce qui est mesuré, les capteurs décisionnels (pour scanner plus finement par exemple).

4 présentations plénières (et un poster) ont été faites:

- Exemple d'instrumentation en ballon et avion, V. Catoire, LPC2E;
- Le réseau drone, F. Foucher, CBM;
- Vol adaptatif ou en essaim, A. Dabas, CNRM;

1- Compatibilité ElectroMagnétique

- Déploiement de *gliders* en zone polaire, J. Melkonian, DT INSU.

Les présentations ont mis en avant plusieurs expertises :

- Un soutien fort de la communauté pour le réseau drone
- Des missions bien définies.

Les manques ou besoins qui sont apparus sont les suivants :

- Faire cohabiter au mieux les moyens aéroportés drones avion/ballon ;
- Envisager la création d'un réseau capteurs/instruments embarqués ;
- Organiser un programme de R&D dédié ;
- Avoir des modes de financement adaptés aux différents types de besoin (constat des financements multiprogrammes très lourds à gérer pour les PI) ;
- Pouvoir compter sur une réactivité forte des structures opérationnelles en cas de crise, ou d'évènement d'intérêt majeur ;
- Résoudre les difficultés pointées côté transport/assurance lors de l'acheminement des instruments sur le terrain ;
- Mieux organiser dans la chaîne de mise en place de campagne, les moyens d'intégration, d'étalonnage/calibration des instrumentations sur le terrain.

## RÉSEAUX DE CAPTEURS : OPPORTUNITÉ, RÉSEAUX INTELLIGENTS DISTRIBUÉS

4 présentations plénières (et un poster) ont été faites :

- Instrumentation en milieu SIC, L. Longuevergne, Géosciences Rennes ;
- Retour du sous-défi 15, C. Tamburini, MIO ;
- Le réseau ICOS et les programmes associés d'observation des GES, M. Ramonet, LSCE ;
- Nanosat, F. Leblanc, LATMOS.

Les présentations ont montré que la notion de capteurs en réseau se décline en fonction des applications. Les questions et problématiques qui émergent sont les suivantes :

- Qualité des mesures
  - mesures long terme et suivi des dérives

- mesures à haute fréquence spatio-temporelle
- Accès aux données
  - technologie de communication
  - transmission temps réel
  - compression des données
  - intelligence embarquée et traitement *in situ* (*machine learning*, Intelligence artificielle)
- Énergie
  - Stockage (poids des batteries)
  - Récupération d'énergie
  - Système basse consommation (capteurs, actuateurs, communications)

Les infrastructures de recherche distribuées (e.g. OZCAR, ICOS, ACTRIS, ARGO, RESIF/EPOS...) expriment un réel besoin pour le déploiement de réseaux de capteurs innovants. Elles constituent de fait un environnement approprié pour ce type de déploiements :

- Ce sont des sites ou des régions déjà équipés de capteurs ;
- Elles couvrent de nombreux environnements avec différents types de conditions extrêmes ;
- Il existe une possibilité d'accueil de « manip » sur le terrain ou dans des plateformes de test ;
- Il y a une forte expérience sur le déploiement et la maintenance de capteurs sur le terrain.

Les communautés scientifiques de façon large considèrent de plus en plus les capteurs à bas-coûts. Beaucoup de développement de capteurs, et surtout de solutions d'intégrations de ces capteurs dans des boîtiers alimentés/communicants sont en cours.

L'objectif est d'aller vers des réseaux de capteurs intelligents, des solutions déployées et les besoins d'aller vers des stations/réseaux plus autonomes/intelligents sont réels.

Le manque d'échanges entre les communautés est souligné. Sont également fortement demandés :

- la création d'un réseau métier capteur
- un fort besoin d'échange avec les communautés expertes en méthode de *machine-learning*.

## 2. Recommandations

### OSU : NŒUD D'ÉCHANGES, COMPÉTENCE ET SAVOIR-FAIRE, CONCEPTS INSTRUMENTAUX ET MONTAGE PROJET

Au niveau national, il a été constaté une hétérogénéité de taille et un morcellement des OSU, mais aussi une disparité de fonctionnement et d'organisation avec les UMR. Il n'existe par ailleurs aucun outil pour fluidifier les transferts de développements entre domaines instrumentaux de l'INSU, et encore moins d'appel d'offres et de guichet dédié au développement instrumental à l'INSU. De même, aucun appel d'offre ne permet une bonne collaboration entre domaines INSU pour des projets interdisciplinaires.

Au niveau local, on observe une connaissance trop faible des compétences et instruments existants intra-OSU. Il n'y a pas suffisamment d'échange entre les UMRs au sein d'un même OSU. En outre, les OSU sont peu ou pas ouverts vers les autres instituts du CNRS. Le pilotage des projets de développement est aussi jugé insuffisant.

Les recommandations pour répondre à ces problématiques sont par ordre de priorité :

- Favoriser les échanges en créant des plateformes d'équipements soutenues par l'INSU et des plateformes de compétences au sein des OSU facilitant les échanges entre UMR ;
- Favoriser l'homogénéisation des organisations des UMR au sein des OSU et des OSU au sein du CNRS/INSU ;
- Mandater les OSU pour créer/valoriser des catalogues de compétences en local ;
- Mandater les OSU pour créer des catalogues d'équipements locaux ;
- Support aux montages projets et demande aux OSUs d'identifier les projets en cours de montage et les projets en cours de développement.

### MIEUX TRAVAILLER ENSEMBLE SUR LE DÉVELOPPEMENT DE L'INSTRUMENTATION EN MILIEUX EXTRÊMES ?

Les différents points abordés se sont focalisés principalement sur les problématiques suivantes :

- Les Ressources Humaines :
  - Comment limiter la perte des compétences dans les laboratoires ?
  - Comment gérer le besoin de compétences très spécifiques non disponibles dans les labos ?
  - Comment faciliter la connaissance et l'accès à des spécialistes ?
- Le développement instrumental :
  - Comment éviter la duplication d'études instrumentales similaires dans plusieurs laboratoires ?

- Comment intégrer au mieux une méthodologie de développement idéale en lien avec le besoin ?
- La propriété intellectuelle : Comment tenir compte au mieux des prérogatives des différents partenaires du projet (entreprise privée, labo...) en fonction des finalités de celui-ci ?
- L'intervention de la division technique de l'INSU :
  - Les appels d'offres de la division technique de l'INSU sont vus comme s'adressant aux gros projets uniquement. Comment dépasser ce constat ?
  - Comment faire bénéficier les laboratoires de l'INSU des conseils ou expertises de la Division Technique ?

Les recommandations identifiées pour répondre à ces problématiques sont par ordre de priorité :

- Recenser au sein de l'INSU les moyens de tests et étalonnages ;
- Mettre en place des soutiens DT INSU hors appels d'offre pour conseil-expertise ;
- Harmoniser les outils de développements (CAO mécanique, électronique...) au sein de l'INSU et même plus largement au CNRS via les réseaux métiers ;
- Partager les design et/ou briques de base (hard/soft) à la communauté ;
- Favoriser l'ingénierie concourante, l'utilisation de prototypes, la méthode agile ;
- Réseau ou site web des développements en cours ;
- Identifier des experts métiers dans les labos/OSU ;
- Mettre en place une revue de développement technique avec IT/direction DT INSU pour aide/conseil.

### QUELLES COMPÉTENCES POUR LE DÉVELOPPEMENT ?

La première question a été de définir les compétences ou contraintes qui sont spécifiques aux milieux extrêmes, et qui ont un impact sur les activités de développement. Le champ d'application aux milieux extrêmes oblige en effet à dépasser les techniques sur étagère, et implique souvent des capacités de conception et d'exploration de nouvelles technologies. Il est donc essentiel de pouvoir échanger régulièrement avec des collègues du même domaine, de rester informé des derniers développements, et notamment des technologies déjà éprouvées par d'autres équipes (cf. les REX). Le travail sur le terrain, en conditions extrêmes, pour la mise en route et l'exploitation des instruments, comporte des contraintes d'accès sur site, des contraintes physiques et d'horaires qui sont propres à ces milieux.

La problématique logiquement abordée ensuite a été celle de la mutualisation de ces compétences. L'expérience acquise (difficultés ou échecs rencontrés) par des individus isolés ou

de petites équipes sur des développements spécifiques aux milieux extrêmes est parfois difficile à partager ou à valoriser une fois le projet terminé (frein financier ou temporel).

Ensuite, la difficulté de maintenir et étoffer les compétences dans le domaine du développement, a été mise en avant. Ces dernières sont souvent spécifiques aux différents terrains d'observation extrêmes étudiés, ce qui rend encore plus difficile la transmission et le renouvellement des postes. La gestion de la perte d'un poste (NOEMI, retraite, personnel en CDD...) est souvent problématique, et se traduit par un appauvrissement en compétences pour l'unité concernée, en plus de la baisse en RH. Le recours au CDD, intéressant en cas de pic d'activité dans un projet, implique un investissement en temps et une gestion spécifique qui doivent être pris en compte. Sur le long terme, cela concourt à un affaiblissement et une fragilisation de nos capacités de développement, notamment pour les activités liées aux milieux extrêmes.

L'originalité et les conditions très particulières rencontrées dans les milieux extrêmes obligent les acteurs du développement à une ouverture sur des compétences ou des domaines qui dépassent le cadre de leur fiche métier. En effet, ils sont amenés à réfléchir et anticiper bien plus que sur des études classiques, et à interagir avec différents corps de métier. De plus, en particulier pour ceux qui travaillent en équipe réduite, il est nécessaire de maîtriser des compétences génériques, comme la qualité, la logistique, la gestion de produit, voire des connaissances en marché public ou en valorisation, ou bien de posséder ou pouvoir accéder facilement à des connaissances dans ces domaines.

Les recommandations proposées pour aborder ces questions sont par ordre de priorité :

- Favoriser les échanges et les partages entre personnels : construire au niveau de l'INSU une base de données et/ou un outil internet associé pour mettre à disposition un inventaire des compétences présentes dans les unités, mais aussi des moyens de développement, voire une banque de données des projets (en cours ou terminés, cf. partage de REX profitables à la communauté). Des outils comme [plugin-lab](https://trouverunexpert.cnrs.fr) ou encore <https://trouverunexpert.cnrs.fr> pourraient servir de base à la réflexion.
- Créer un réseau métier « instrumentation en milieux extrêmes » pourrait être favorisé par le CNRS, et l'INSU en particulier. Cela permettrait de constituer une liste d'experts (conseils sur un nouveau projet d'instrumentation en milieux extrêmes, ou mise en relation des personnes travaillant sur des projets similaires).
- Soutenir financièrement ou en RH les OSU ou les unités qui acceptent de prêter pour des séjours courts des personnels

à d'autres unités (cf. convention mois invités EC). Ce type de soutien pourrait aussi être géré par les réseaux métiers.

- Renforcer les offres de formation type ANF, ou l'action des réseaux comme le réseau drone ou le réseau MAPI sont également des leviers intéressants à mettre en œuvre.
- Au niveau des laboratoires, des OSU, et de l'institut, il apparaît important de mieux prendre en compte les spécificités des métiers liés au développement de l'instrumentation, ou de sa mise en œuvre dans les milieux extrêmes. On pourrait réviser certaines fiches métier dans ce sens, en y incluant (i) des contraintes, compétences et savoir-faire liés aux activités de terrain, et (ii) une meilleure prise en compte des activités transversales allant de pair avec ces fonctions (intégration, qualité, instrumentation au sens large, management de projet...) La valorisation de ces compétences doit également être effectuée dans la carrière des personnels concernés.
- Enfin, au niveau des unités, et avec l'aide des services RH des délégations régionales, il serait intéressant d'avoir des guides pour valoriser et capitaliser le travail des contractuels dans ce domaine, ce qui bénéficierait autant aux unités, qu'aux personnels précaires concernés.

Comment effectuer au mieux la maintenance instrumentale ? Les différents points abordés se sont focalisés principalement sur les problématiques suivantes :

- Les ressources humaines :
  - Manque de temps et de compétences pour maintenir le parc d'instruments existants ;
  - Comment mutualiser efficacement les personnels et/ou les moyens techniques dans un même OSU ?
  - Comment valoriser dans les dossiers de carrière des agents les opérations de maintenance et les activités de routine (cf. SNO) ?
- Les ressources budgétaires :
  - Manque de moyens financiers pour assurer la maintenance et/ou la modernisation des appareils ;
  - Manque de transparence des fournisseurs (cf. appareils « boîtes noires »), prix des pièces détachées exorbitant ;
  - Comment assurer ou financer les casses de matériel, comment gérer l'obsolescence de composants ?
- Le développement instrumental :
  - Comment optimiser l'utilisation des instruments ?
  - Du matériel opérationnel est stocké dans les labos et inutilisé, donc non maintenu ;
  - Attirance des financeurs et équipes de recherche par du matériel innovant dernière génération, parfois difficile à maintenir en bon état de fonctionnement.

Les recommandations proposées pour aborder ces questions sont par ordre de priorité :

- Soutenir le maintien des sites déjà instrumentés, ajouter

par ex. une ligne « soutien à l'instrumentation » dans les dotations CNRS;

- Encourager le réseautage en local (campus, OSU...);
- Communiquer sur l'utilisation et la maintenance des appareils, leur assurance et les montages financiers intelligents;
- Proposer des critères de choix de fournisseurs et négocier avec les principaux fournisseurs pour réduire les coûts d'achat des consommables;

- Inciter les projets en faveur du Développement Durable (cf. bourse CNRS pour don/vente de matériels);
- Réfléchir à un modèle économique sur le long terme qui inclurait les frais de consommable, de maintenance préventive et curative;
- Prévoir le budget maintenance dès le début du projet (≈ 10% /an du coût initial du projet);
- Prévoir un contrat de maintenance + extension garantie.

## RÉCAPITULATIF DES RECOMMANDATIONS

Cet atelier a réuni une communauté large permettant d'initier de nombreuses discussions et de dégager des enjeux communs et transverses entre les différents domaines AA, OA, SIC et TS du CNRS-INSU. Au travers des discussions, l'intérêt du développement de cette transversalité entre les domaines scientifiques est apparu très pertinent. Cette transversalité en termes de développement instrumental en milieux extrêmes et partage de technologie reste cependant limitée, s'appuyant principalement sur des initiatives individuelles issues d'un contexte local favorable.

Ainsi les recommandations communes présentées ci-dessous portent sur différents points comme les moyens techniques et équipements, les moyens financiers, l'organisation des projets, les métiers et moyens RH ainsi que la formation et les liens avec la DT. Ces recommandations devraient permettre dans le futur de construire et de faire émerger une stratégie instrumentale et technologique transversale au CNRS-INSU.

### 1. MOYENS TECHNIQUES ET ÉQUIPEMENTS

- Favoriser les échanges en créant des plateformes d'équipements soutenues par l'INSU au sein des OSU facilitant les échanges entre UMR:
  - Recenser au sein de l'INSU (voire plus largement au sein du CNRS et des autres organismes) les moyens de tests et étalonnages
  - Mandater les OSU pour créer des catalogues d'équipements locaux
- Promouvoir les Bonnes pratiques de gestion d'équipements: utilisation, maintenance, assurance, modèle économique (partager design et/ou briques de base (hard/soft) à l'échelle de l'INSU, inciter les projets en faveur du Développement Durable.

### 2. MOYENS FINANCIERS

- Nécessité de disposer de moyens de financement adaptés pour la R&D et le développement instrumental à l'INSU
- Soutenir le maintien des sites instrumentés : ligne DIALOG « soutien à l'instrumentation »

3. ORGANISATION PROJET : Support aux montages projets, et demander aux OSU d'identifier les projets en cours de montage et les projets en cours de développement.

### 4. MÉTIERS ET MOYENS RH

- Identifier des experts métiers dans les labos/OSUs. Construire une base INSU métier et/ou un outil internet associé, inventaire des compétences et projets (en cours ou terminés). Voir par ex. plug-in-lab ou <https://trouverunexpert.cnrs.fr>;
- Travailler davantage encore en réseaux :
  - Besoin fortement exprimé d'un réseau métier « capteurs »
  - Créer un réseau « instrumentation en milieux extrêmes » INSU ou CNRS (+ IN2P3, INP, Inrae, IFREMER, IPEV, Météo France, CNES)
- Partage de compétences
  - Favoriser les échanges par des plateformes de compétences (catalogues à l'échelle des OSUs)
  - Favoriser les échanges de personnels pour des séjours courts (gestion par réseaux métiers ?)
  - Soutien financier/RH pour les unités des agents mis à disposition

### 5. FORMATION

- Promouvoir l'ingénierie concurrente, l'utilisation de prototypes, la méthode agile
- Renforcer les offres de formation type ANF, ou l'action des réseaux comme le réseau drone ou le réseau MAPI, qui sont également des leviers intéressants à mettre en œuvre

6. LIENS AVEC LA DT : Mettre en place des soutiens DT INSU hors appels d'offre pour conseil-expertise.

# Défi 17

*Vers l'exascale :*  
convergence HPC  
et HPDA ?

**Conseil scientifique:** Frédéric Bournaud, Emmanuel Chaljub, Benoît Commerçon, Yohan Dubois, Marie-Alice Foujols, Sylvie Joussaume, Gerhard Krinner, Roland Martin, Pierre Ocvirk, Benoît Semelin, Jean-Pierre Vilotte.



Cyril FRESILLON / IDRIS / CNRS Photothèque

L'exascale ( $10^{18}$ ) représente l'ordre de grandeur des capacités de calcul intensif prévues pour le début des années 2020. Le HPC ou Calcul à Haute Performance concerne les capacités de calcul utilisés par les simulations les plus lourdes depuis de nombreuses années sur les centres de calcul nationaux. Compte tenu des limites techniques atteintes, cette capacité de calcul est rendue possible avec des architectures dites accélérées dont la programmation représente une rupture majeure. HPDA ou Analyses de Données à Haute Performance concerne les traitements intensifs de données à partir d'outils d'Intelligence artificielle (*machine learning, deep learning*) sur de grands ensembles

de données. Les travaux internationaux associent depuis longtemps les deux approches HPC et HPDA dans le cadre du projet BDEC<sup>1</sup> (*Big data and extremescale computing*). La convergence de ces deux approches, c'est-à-dire la capacité de créer des environnements qui permettent à la fois le calcul haute performance et les analyses de grands jeux de données d'observation et de simulation avec les techniques d'intelligence artificielle, représente un enjeu repéré lors de la mise en place de la prospective transverse INSU. À ce stade, la convergence HPC HPDA reste une question ouverte à aborder conjointement avec les producteurs de données.

1- <https://www.exascale.org/bdec/>

# 1. Enjeux

La modélisation et la simulation numérique jouent un rôle essentiel dans le domaine des sciences de l'Univers. Elles complètent les observations et apportent un outil indispensable d'interprétation des observations, de compréhension des mécanismes et de prévision. Elles ont permis des avancées majeures que ce soit en modélisation du climat, en cosmologie ou en sismologie.

La simulation numérique a bénéficié ces dernières décennies des évolutions technologiques importantes des supercalculateurs. Cependant, la fin de la loi de Moore met un terme à l'augmentation régulière de puissance des processeurs. La communauté de modélisation INSU, ainsi que toutes les communautés utilisatrices du calcul intensif, doivent faire face à une complexité croissante des architectures des machines qui deviennent plus hétérogènes et mêlent différents types de technologies. Pour franchir ce mur de *l'exascale*, les communautés INSU doivent s'organiser pour se préparer à ce défi de taille. D'autre part, la taille des données de simulations à traiter augmente alors même qu'il devient de plus en plus coûteux de déplacer les données. Enfin, l'avènement de nouvelles méthodes en intelligence artificielle apporte de nouvelles perspectives en matière d'analyse de données voire de développement de paramétrisations.

## LES CODES DE SIMULATION

La modélisation est au cœur des moyens d'investigation de l'INSU en complément des observations. Les codes et bibliothèques de calcul intensif représentent un investissement massif de chaque communauté INSU (AA, OA, ST, SIC). Plusieurs communautés se sont regroupées autour de codes partagés, comme par exemple en OA où des codes communautaires ont été labellisés. Ces codes capitalisent une quantité importante de développements, de travaux de recherche et d'ingénierie, qui peut aller jusqu'à plusieurs centaines voire un millier d'hommes/an. Il est important de pouvoir continuer à utiliser ces codes et à les faire évoluer afin qu'ils puissent utiliser les nouvelles architectures des calculateurs, que ce soit dans le cadre national avec GENCI ou dans le cadre européen avec PRACE. Le programme ambitieux EuroHPC de l'Europe offre également des perspectives d'accès à des machines pré-exascales (dès 2021) et *exascales* (à partir de 2023) qui permettront d'atteindre des puissances de l'ordre de  $10^{17}$  -  $10^{18}$  opérations par seconde. De telles puissances permettront d'augmenter la taille, la complexité, la résolution ou le nombre d'expériences des systèmes à simuler.

Cependant, afin d'atteindre de telles puissances, les architectures deviennent plus complexes à programmer et font appel à de nouvelles technologies. Le problème se cristal-

lise sur ces technologies dites accélérées qui possèdent peu de mémoire, des temps de latence importants, ce qui est contradictoire avec des simulations complexes qui passent beaucoup de temps à manipuler leurs données mémoires, impliquant d'ajouter un micro-management fin de la structure de données. Dans les années à venir, pour pouvoir exploiter ces nouvelles technologies, l'environnement de programmation et de développement des codes de calcul est amené à changer. Pour rassembler les compétences nécessaires, il faudra passer du « programmeur héros » à des équipes multidisciplinaires autour d'outils pérennes et standardisés (bibliothèques, interfaces...). Si on veut pouvoir bénéficier de ces technologies, la communauté INSU devra accompagner ce changement. Ceci va non seulement nécessiter une veille technologique conséquente mais demandera également de soutenir et stabiliser les équipes de développement des codes et de renforcer leurs expertises multidisciplinaires.

Ce défi est stratégique pour les différents domaines de l'INSU et pourrait faire l'objet d'une action nationale transverse HPC. Celle-ci permettrait d'élaborer une stratégie commune à l'INSU, de faciliter les échanges de bonnes pratiques et de collaborations, de saisir des opportunités de soutien au niveau national ou européen, de développer des actions de formation. Ce défi nécessitera également de soutenir le portage des codes au sein des équipes mais aussi en collaboration avec GENCI et d'autres disciplines (voir ci-dessous).

## SIMULATION NUMÉRIQUE ET DONNÉES MASSIVES

La simulation numérique en sciences de l'Univers est productrice de données massives. Leur stockage, leur analyse, leur archivage ainsi que la capacité de leur réutilisation sont importants pour valoriser les investissements en simulation numérique. Le déploiement de *workflows* complexes avec des données d'observations, des codes d'analyses, d'assimilation, des codes de simulations et le stockage associé pérenne ou temporaire, deviennent également un enjeu important.

Face aux besoins de la gestion des données massives en simulations numériques, un continuum d'infrastructures calculs et données doit être assuré ainsi que la mise en œuvre de plateformes logicielles facilitant l'exploitation des données.

D'une part, les moyens de calcul nationaux doivent bien prendre en compte le dimensionnement des capacités de stockage des résultats de simulation au sein de GENCI, l'INSU étant le plus gros utilisateur de ces moyens.

D'autre part, l'articulation entre ces moyens nationaux et l'exploitation et l'archivage des données doit être renforcée. Les OSU jouent un rôle important dans la gestion des données mais également les mésocentres régionaux qui concentrent des ressources de calcul très utiles à l'analyse des données de simulation. Leur articulation et interconnexion est importante. Le projet PIA3 GAIA-data associant l'IR DataTerra, l'IR CLIMERI-France et l'IR PNDB va dans ce sens en développant une interconnexion de données et de services sur les observations et les résultats de simulations numériques du système Terre. Les centres nationaux envisagent également le développement d'offres de services qui pourraient permettre d'allier calcul et données et pourraient apporter une offre complémentaire utilisable pour d'autres usages de l'INSU.

### L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE, LE HPC ET LES DONNÉES

L'intelligence artificielle (IA), avec ses différentes méthodologies de *Machine Learning* et *Deep Learning*, présente plusieurs atouts pour la communauté INSU de la simulation numérique. D'une part, elle permet de traiter de grandes masses de données telles que celles issues de la simulation numérique. Si les réseaux neuronaux sont déjà utilisés depuis longtemps, de nouvelles approches peuvent augmenter la capacité d'analyser simulations mais aussi observations. D'autre part, fait plus récent, l'IA peut apporter de nouvelles approches de modélisation et de développement de paramétrisations et d'émulateurs, encore à l'état exploratoire dans nos domaines. Ces approches pourraient permettre d'accélérer la simulation numérique de certains processus et de gagner en rapidité de calcul. À l'inverse l'INSU avec ses grandes quantités de données peut attirer une communauté IA. À ces fins un effort important devra être fait en terme de formation sur les aspects IA orienté sciences de la Terre et de l'Univers mais aussi sur les aspects théoriques et pratiques (outils existants ou en développement) afin de doter nos chercheurs et ingénieurs d'un « background » suffisant permettant d'interagir plus facilement avec les communautés de mathématiques et d'informatique. Cela permettrait aussi d'élargir les collaborations et les champs possibles de recherche à forte valeur ajoutée. Entre autres possibilités, le choix des données et paramètres de modèles pertinents pourrait alors être ainsi mieux défini, et permettrait non seulement de réduire l'espace des paramètres utiles aux modélisations et traitements/inversions de données mais aussi de réduire les espaces de stockage ainsi que les temps de calculs massifs comme cela a commencé en OA dans le projet HighTune (LMD).

### RESSOURCES HUMAINES ET EXPERTISE

La communauté INSU s'accorde sur l'importance du niveau de professionnalisme et d'expertise multidisciplinaires indispensables au développement et à l'exploitation des codes numériques à l'échelle de *l'exascale*. Il faut former, recruter et valoriser la double compétence : science et calcul. Cela est tout aussi indispensable pour le lien avec l'intelligence artificielle (*machine learning* et *deep learning*). Ceci passe par des enjeux de ressources humaines, de formation et de collaborations.

Le recrutement pérenne d'ingénieurs de recherche pour le développement des codes de simulation numérique et des outils d'analyse associés est indispensable et doit se faire au plus proche des pratiques et des enjeux de la recherche. Ce renforcement pourrait se faire autour de codes communautaires ou de développement d'outils ou bibliothèques communautaires. Il est nécessaire pour renforcer les collaborations avec des centres de compétences en HPC au niveau national ou européen. Au-delà du recrutement d'IR avec des compétences en HPC, il sera important de veiller également à la reconnaissance des compétences en HPC pour l'évaluation et le recrutement de chercheurs travaillant sur le développement des codes. Une nouvelle section, comme l'ancienne section 13, ou la section modèles et données de l'IRD permettrait d'identifier formellement ce besoin.

La formation est nécessaire pour accompagner le changement de pratiques et d'expertises dans les activités de développement de codes pour les codes déjà existants. Des formations adaptées aux besoins des communautés INSU pourraient être développées en partenariat avec les centres de calcul nationaux et des centres d'expertise en HPC et en IA. Elles permettraient d'apprendre à mieux utiliser les nouvelles architectures (ex utilisation des GPU, différents niveaux de mémoire...), de former aux nouveaux outils ou approches, de former aux outils de l'IA. Les besoins en formation pourraient être analysés au sein de l'action nationale transversale HPC.

Les collaborations avec les experts du calcul intensif d'Inria, des autres instituts du CNRS, des centres de calcul (régionaux, nationaux et européens) et des centres de compétences (CERFACS, Maison de la Simulation, réseau MSO<sup>2</sup>, Centres d'excellence en HPC européens...) sont également essentielles pour apporter des compétences spécialisées sur le HPC ou l'IA. Il est important néanmoins qu'elles puissent être soutenues dans la durée. Elles seront d'autant plus efficaces que les équipes au plus près des codes disposeront d'ingénieurs capables de collaborer avec ces centres d'expertise. Un exemple a été donné récemment avec le contrat d'objectif de l'IDRIS qui montre l'apport essentiel de l'expertise au plus près des codes pour le portage sur accélérateurs GPU (codes RAMSES en AA et code DYNAMICO en OA) mais met également en évidence le besoin d'actions de plus long terme et élargies à d'autres codes clés de la communauté.

2- Le réseau Modélisation Simulation Optimisation est coordonné par l'AMIES et rassemble les maisons de la modélisation et simulation en France : <https://www.agence-maths-entreprises.fr/a/?q=fr/reseau-mso> Ils ont défini une mission principale sur les relations avec les PME

## 2. Recommandations

Si on veut que les communautés INSU puissent rester au meilleur niveau international en simulation numérique et puissent bénéficier des moyens de calcul nationaux et européens, il est important que l'INSU se saisisse de l'enjeu du HPC qu'on résume en général sous l'enjeu de *l'exascale* et mette en place un certain nombre d'actions proposées ci-dessous.

Ceci passe par le développement d'une stratégie dans le domaine du calcul intensif, le besoin de sensibiliser et de former les équipes aux nouvelles technologies, au renforcement des ressources humaines, au développement de collaborations avec des centres d'expertise.

À cet enjeu sur le HPC, s'ajoute celui du traitement des grandes masses de données de la simulation mais aussi à leur interconnexion avec les observations à travers un continuum d'infrastructure associant calcul et données et une stratégie nationale reliant national et centres régionaux.

Enfin, le développement de l'IA peut bénéficier aux équipes de l'INSU en modélisation et devrait être considéré avec attention en lien avec les producteurs de données (Défi 13) et les données ouvertes (Défi 14).

Les actions proposées sont les suivantes :

- Lancer une Action Nationale INSU Transverse sur le HPC visant à développer une stratégie nationale face aux enjeux de *l'exascale*. Profitant du dynamisme des relations entre domaines de l'INSU que cet atelier a montré, cette ANT HPC permettrait de préparer les communautés INSU aux enjeux des nouvelles architectures, de développer une politique commune autour de codes et de bibliothèques partagés, d'analyser les besoins en termes de formation, de faciliter le développement de collaborations interdisciplinaires, de faciliter les échanges de bonnes pratiques, de faciliter une mutualisation de l'expertise. Elle permettrait également de porter une analyse INSU des besoins des communautés en HPC dans le cadre na-

tional et européen.

- Renforcer les compétences en ingénierie des codes. En effet, l'arrivée de technologies plus complexes à utiliser va nécessiter de porter les codes, voire de les réécrire complètement. Elle nécessitera de travailler en étroite collaboration avec des experts du HPC, ce qui nécessite des ingénieurs compétents en HPC au plus près des codes. Dans le prolongement de l'ANT HPC, cela permettrait de faire émerger un pôle d'expertise INSU en phase avec les communautés et à l'interface avec les grands centres nationaux. Cela pourrait constituer une nouvelle contribution INSU à la maison de la simulation ou un réseau métier nouveau.
- Développer des formations en HPC mais aussi en IA adaptées aux besoins de l'INSU. Dans le domaine du HPC, des formations spécifiques pourraient être développées en partenariat avec GENCI. Dans le cas de l'IA, des collaborations avec l'INS2I et Inria pourraient permettre de développer des formations adaptées. Le but recherché est d'attirer l'expertise IA vers les domaines de recherches INSU.
- Développer des collaborations autour de la préparation à *l'exascale* avec des centres d'expertise en HPC, les centres de calcul nationaux et européens.
- Soutenir le développement de plateformes d'interconnexion des données et des services, intégrant les différents niveaux, nationaux, régionaux et les OSU. Ces plateformes pourraient constituer une contribution de l'INSU au développement de l'EOSC. Prévoir d'améliorer le débit des réseaux numériques entre OSUs, plateformes de données et de calcul en se coordonnant avec Renater et avec les autres acteurs nationaux dont le CNES.
- Soutenir formellement les échanges et interactions entre les communautés d'observations et les communautés modélisation et simulation, toutes productrices de grands jeux de données, en organisant pour commencer un atelier dédié si ce n'est une série d'ateliers.

# Questions transverses

# 1. Intégration aux ODD et liens avec la transition énergétique et écologique

## OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE



### DÉFIS 3 ET 4

L'étude des liens climat/géo-biosphère est centrale dans le cadre des ODD. Il en va de même de sa déclinaison dans le passé, qui peut servir de référence et de banc d'essai pour les codes numériques. Une meilleure compréhension des *proxies* utilisés en paléocéologie et paléoclimatologie (qui sont souvent aussi utilisés dans l'Actuel) peut participer à une meilleure anticipation des transitions actuelles et des défis qui leurs sont associés. Nos disciplines sont ainsi au cœur d'une meilleure compréhension de l'ensemble des perturbations environnementales associées aux activités humaines ainsi que du changement climatique actuel et des impacts écologiques associés.

D'autre part, une meilleure compréhension fondamentale des cycles géochimiques ou des points de basculement de la biosphère est clairement en lien avec les ODD « Lutte contre le changement climatique », « Vie aquatique », et « Vie terrestre ». L'intégration de ces communautés, et la prise en compte de l'évolution des paléoenvironnements dans le temps et l'espace permettra également de comprendre l'évolution de la qualité des réservoirs (non carbonés vers la transition énergétique, par exemple géothermie, hydrogène), la quantification des ressources ou avoir des répercussions sur l'exploration et l'exploitation des gisements

métallifères supergènes (utilisation de métaux rares dans les panneaux solaires, par exemple), en lien direct avec les défis 6 et 7.

Enfin, au niveau de l'étude des écosystèmes actuels, l'analyse des récupérations écosystémiques et communautaires suite aux exploitations humaines et à leurs déprises (par monitoring, expérimentations et modélisation) correspond également aux défis majeurs mis en avant dans le cadre des ODD.

### DÉFI 6

Ci-dessous la synthèse issue de la prospective du CT5 CES-SUR:

#### Ressources métalliques pour la transition énergétique

L'évolution rapide des technologies et des choix concernant la transition énergétique et de réduction des gaz à effets de serre nécessite de maîtriser l'évolution dans le temps des besoins en matières premières, en particulier des métaux dits « critiques nécessaires » aux batteries des voitures électriques (Li, Mn, Ni, Co, C), à l'énergie éolienne (Nd, Dy) ou certaines techniques photovoltaïques (Ga, Sb, In, Te) mais

également les substances de grand intérêt économique comme les métaux de base (Cu, Al) qui sont également nécessaires à cette transition. À ces métaux, s'ajoute également d'autres éléments nécessaires à l'amélioration des alliages (Nb, Ta, W), à l'allègement des structures métalliques (Sc), et aux nouvelles technologies de la communication et de l'informatique (Ge, In...).

La situation de probables futurs déficits dans la disponibilité en métaux stratégiques (analyse mondiale et UE) encourage une exploration accrue, car en période de croissance de la consommation, même un recyclage complet ne serait pas suffisant pour alimenter les besoins, et les ressources primaires seront nécessaires. Un développement des recherches sur le cycle des métaux stratégiques, les facteurs de concentration, de préservation ou de dispersion dans l'environnement, est plus que vital. Par ailleurs, l'analyse du contexte social, économique et environnemental de l'exploitation des métaux est une des clés de l'intégration territoriale des futures exploitations.

L'évolution des concepts miniers, notamment le fait de ne pouvoir envisager une exploitation sans avoir une vision intégrée de l'ensemble du cycle change considérablement le positionnement des travaux sur les métaux. L'ouverture d'une mine nécessite en effet de parfaitement connaître: i) les réserves au long terme, et donc de prédire les durées d'exploitation, ii) la nature du minerai qui conditionne les choix de traitement et les implications environnementales, iii) l'évaluation des conditions de mise en place du projet minier du point de vue social et environnemental. Les nouveaux concepts de mine propre doivent en effet être de plus en plus convaincants pour que la mine soit socialement acceptée. Enfin, l'emploi créé n'aura de sens que s'il est durable, ce qui implique des études économiques rigoureuses. L'étude des métaux devient donc une approche multidisciplinaire, transverse, intégrée qui met en jeu tout le savoir depuis la géologie, en passant par les aspects ingénierie (technologies de l'exploitation, génie minier, génie minéral et chimique) jusqu'à la mise en œuvre de tous les savoirs dans le domaine environnemental (de la restauration des sols jusqu'à l'écotoxicologie), ceci dans un contexte de mondialisation, ce qui exige d'appréhender le contexte et les conséquences sociales et économiques.

## Géothermie

Pour la géothermie basse température (usage direct de la chaleur): Les réseaux de chaleur en France sont en grande partie dépendants des combustibles fossiles (42%), et la part de la géothermie profonde dans l'usage direct (géothermie basse énergie) représente moins de 5% du bouquet énergétique des réseaux de chaleur malgré un potentiel non négligeable. Son déploiement, notamment dans les métropoles, est limité par des risques géologiques élevés qu'une opération nouvelle n'obtienne pas une ressource géothermique présentant des caractéristiques de débit et de température suffisantes pour assurer la rentabilité du projet pendant sa durée de vie. Les retours d'expérience soulèvent des problèmes techniques et/ou scientifiques pour un fonctionne-

ment efficace et durable des doublets géothermiques, tels que le risque élevé, mais non quantifié, de faible débit d'eau / faible épaisseur du réservoir (métrique), le risque d'interférence entre doublets géothermiques dans les zones urbaines à forte densité d'infrastructures ou le risque de percée thermique précoce. Pour la géothermie profonde (haute température) le risque géologique constitue un obstacle au développement futur de la géothermie. Il est nécessaire de développer des outils permettant de réduire ces risques, en particulier pour les ressources géothermiques non conventionnelles ou les réservoirs de chaleur dans les bassins intracratoniques. Les interactions fluides-roches dans les réservoirs, notamment en conditions de stockage et d'exploitation doivent être mieux suivies et contraintes. Cette thématique, transverse aux suivantes sur le stockage d'H<sub>2</sub> ou de CO<sub>2</sub>, soulève de nombreuses questions scientifiques. Pour augmenter la rentabilité de la géothermie profonde (très coûteuse par ses forages profonds, > 2500m) il faut aller vers une utilisation plurielle de la ressource, à savoir l'eau géothermale profonde naturelle: chaleur, électricité, lithium, hydrogène natif, etc. Beaucoup de questions sont encore ouvertes pour une optimisation d'une exploitation mixte avec une demande variable dans le temps (été/hiver, journée, etc.)

Les réserves d'hydrogène naturel qui semblent actuellement limitées sont probablement sous-estimées en raison d'une exploration balbutiante, de l'absence de concept sur les mécanismes de diffusion ou d'accumulation. Les difficultés technologiques de la récupération constituent le deuxième verrou à lever pour l'exploitation de l'hydrogène. En ce qui concerne l'intégration aux ODD, les questions de ressources peuvent clairement relever des:

- ODD 2 (Faim « Zéro ») pour les questions de gestion de la qualité des sols (salinisation, érosion des sols, matière organique, nutriments...);
- ODD 6 (Eau propre et assainissement) au regard de la connaissance de la dynamique des quantités et qualités de la ressource en eau;
- ODD 12 (Consommation et production durables) au regard de la production des ressources énergétiques via des filières durables;
- ODD 13 (Mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques) par exemple, sans être exhaustive en pensant à la qualité des sols et à la neutralité carbone (AD).

## DÉFI 8 : LA SOUTENABILITÉ EN LIEN AVEC LES ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES EN MILIEU POLAIRE

Un état des lieux de la question de la soutenabilité a été rapidement effectué:

- Mener des activités scientifiques contribue directement ou indirectement à l'accroissement des dommages environnementaux. Dans la mesure où les activités scientifiques polaires se développent dans les régions polaires, les risques d'impacts sur l'environnement sont réels que ce soit lors des trajets pour se rendre sur le terrain (transport aérien et maritime) ou sur le terrain (impact sur la faune et la flore).

- Les activités scientifiques sont soumises à des obligations juridiques en faveur d'une protection de l'environnement.

En Antarctique, une approche internationale est retenue. Le protocole au Traité sur l'Antarctique relatif à la protection de l'environnement (Madrid, 1991) fait de l'Antarctique une réserve naturelle consacrée à la paix et à la science. L'Antarctique n'est pas réservé aux seuls scientifiques. Comme toute activité humaine, les projets d'activités scientifiques doivent notamment faire l'objet d'une évaluation d'impact sur l'environnement.

En Arctique, aucun traité international n'a retenu une approche globale de la protection de l'environnement. Des traités internationaux sectoriels ainsi que des réglementations nationales peuvent s'imposer aux activités scientifiques.

L'objectif de la table-ronde était de réfléchir à la soutenabilité en lien avec les activités scientifiques en milieu polaire. Comment être plus vertueux dans la recherche antarctique? Comment améliorer les comportements durables des activités scientifiques? Les participants ont reconnu qu'un effort était nécessaire en la matière, même s'il a été souligné que le coût environnemental de certaines des recherches polaires devait être pesé à l'aune de ses retombées au niveau global (exemple des carottages de glace conduit par Lorient et ses équipes, ayant démontré le rôle des gaz à effet de serre dans l'évolution naturelle du climat). Différentes propositions ont été faites.

### La reconnaissance d'un effort nécessaire

Les participants ont reconnu l'importance de :

- Respecter les obligations environnementales mêmes si elles mériteraient d'être mieux connues des scientifiques, et plus accessibles. Elles peuvent parfois être appréhendées comme contraignantes pour les scientifiques, car exigeant une forte anticipation de l'activité scientifique (gestion des déchets, demandes de permis) et également une approche différenciée suivant le terrain envisagé (Antarctique/Arctique, territoire national d'un État) ;
- Engager des efforts individuels et collectifs en faveur de la protection de l'environnement. Pris individuellement une activité scientifique peut entraîner peu de dommages, le scientifique doit prendre en considération le risque d'impacts cumulés (activités scientifiques, touristiques, pêche...);
- Prendre en considération les difficultés pour une approche plus responsable en raison du terrain (difficulté par exemple de stocker l'énergie d'éoliennes ou de panneaux solaires) ou en raison de la technologie (propulsion duale GNL/fuel des navires) ;
- Prendre en considération le fait que les scientifiques ont parfois besoin de pouvoir s'appuyer sur les navires de touristes en raison d'une offre insuffisante des opérateurs nationaux (pas suffisamment de places sur les navires pour les scientifiques ou bien opérations dans des zones géographiques non couvertes par les opérateurs).

### Recommandations

Établir un bilan environnemental de l'activité scientifique dans les régions polaires et notamment un bilan carbone. Certaines équipes scientifiques le font, il serait intéressant que cela soit fait de manière plus systématique.

- Réfléchir à la mutualisation des moyens en raison de l'importance de la logistique.
  - Quand on est en déplacement, accepter de faire des manipulations pour d'autres équipes, par exemple à bord des bateaux en destination de l'Antarctique: comment être une plus-value dans les déplacements;
  - Mutualiser les ressources humaines des projets à l'échelle d'une unité de recherche;
  - Une meilleure connaissance des moyens disponibles pourrait être recherchée (par exemple un catalogue des moyens polaires);
  - La généralisation des systèmes d'échanges de services entre opérateurs polaires afin d'optimiser l'usage de leurs moyens.
- Améliorer l'accès à la donnée ainsi qu'à l'état des carottes pour la recherche polaire « paléo ». Il n'est parfois pas nécessaire de lancer des nouveaux programmes, des données ou des carottes existent déjà. Il serait intéressant d'avoir un panorama des données et carottes qui existent et pourquoi pas un centre d'archivage des données en libre accès
- Inciter les porteurs d'appels à projets à :
  - Proposer des projets plus responsables.
  - Ne pas exiger systématiquement de l'innovation. Il peut donc être tentant de proposer des nouvelles activités qui ne présenteraient qu'un intérêt scientifique minime. Mais a contrario cette nouveauté permet d'avoir des financements.
  - Employer des instruments plus durables.
  - Procéder à l'automatisation d'instruments qui peut permettre de limiter les coûts de déplacement.
  - Renforcer la réflexion engagée en faveur de la biodégradabilité des capteurs
  - Se rapprocher des industriels pour réfléchir, ensemble, à des instruments plus durables.
- Réfléchir à une *low tech* explorée par la société civile (FabLab), en recherchant des techniques simples, économiques et pratiques. À cette fin, les retours d'expérience pourraient être privilégiés pour partager les initiatives de certaines équipes qui pourraient être reprises par d'autres.
- D'envisager les impacts sur l'environnement dès le début de l'organisation du projet.
- De réfléchir à faire fonctionner les stations scientifiques au maximum de leurs capacités (il faudrait amener plus de scientifiques pour éviter de nouvelles constructions de stations).
- Pour limiter les dommages liés au transport des scientifiques :
  - Proposer de limiter le nombre de personnes sur le terrain afin de diminuer les impacts et de proposer de limiter les scientifiques en mutualisant la mise en œuvre de différents projets;
  - Faire en sorte que la présence à des colloques ne soient pas automatique: possibilité de conférences virtuelles,

et donc convaincre les financeurs de; financer des conférences à distance; des rencontres envisagées dans des hubs (pour accès plus facile);

- Pour limiter les impacts, des modifications dans les cahiers de charge des entreprises pourrait être envisagé, par exemple pour les vêtements (pour éviter les micro-particules), les équipements de logistique (pour éviter les chips de mousse), une meilleure organisation des conteneurs.

En définitive, les participants ont montré qu'ils pourraient être des citoyens engagés en faveur de l'environnement qu'ils étudient. Leur engagement est indispensable pour que leurs recherches puissent être reconnues.

#### DÉFI 14

L'impact écologique et énergétique en lien avec la science ouverte a été mentionné et notre responsabilité dans ce contexte a été soulignée. Les technologies de l'information émettent 2% des émissions de gaz à effet de serre et la taille des données a un impact. Des labels/certifications existent pour la reconnaissance de la conception responsable de service numérique<sup>1</sup>. L'impact de la science ouverte vers la société n'est cependant pas limité à cet aspect écologique et énergétique. La science ouverte, en donnant accès aux données à tous, ouvre des opportunités égales pour les chercheurs de tous les pays, y compris les pays à revenus faibles et intermédiaires (pourvu qu'ils aient accès à internet). Cet impact positif doit aussi être pris en compte et mis en avant.

#### DÉFI 16

La recommandation forte qui ressort de cette table ronde est de sensibiliser à l'échelle de l'INSU les architectes systèmes, mécaniques, électroniques, à l'utilisation de matériaux « propres ». Des échanges inter instituts au CNRS, notamment avec l'INSIS, sont préconisés pour assurer une information des équipes.

#### DÉFI 17

Au-delà des capacités de la simulation numérique d'apporter des éléments de connaissance sur les changements globaux, la question se pose du coût environnemental des infrastructures dans le domaine. Il sera impératif d'inclure cette dimension en prenant en compte le coût en émissions de gaz à effet de serre dans les différentes activités.

Les ruptures technologiques initiées pour *l'exascale* préfigurent les changements des infrastructures calcul à venir. Tout le travail sur l'optimisation des algorithmes, sur la réduction des données, sur l'efficacité énergétique se retrouvera *in fine* sur l'ensemble de l'écosystème qui sera plus sobre.

Un groupe de travail transversal INSU pourrait analyser cette question de la sobriété numérique au regard de la prospective.

2- Par exemple: <https://ecograder.com/>; <https://www.thegreenwebfoundation.org/>; <https://www.greenit.fr/>, Idots

## 2. Communication, diffusion de la connaissance



### DÉFIS 3 ET 4

Les enseignants-chercheurs, de par leur mission d'enseignement, remplissent également d'ores et déjà un rôle essentiel de communication vers le grand public. De nombreux sujets (classiques pour notre communauté comme le cycle du carbone, mais aussi d'autres comme celui de l'azote via le problème des nitrates, ou l'évolution des paléoenvironnements, des paléoclimats et des faunes et flores associés au cours du temps) peuvent servir de vecteurs pour transmettre notre passion et contribuer à la diffusion des savoirs scientifiques. Des nouvelles plateformes web (blogs, « The conversation ») représentent des supports efficaces pour une telle transmission. Certains partenaires comme le MNHN ont une vocation de diffusion de la connaissance. Cependant, l'essentiel des actions actuelles se base sur la volonté et disponibilité de nos collègues et dépend donc d'initiatives locales.

La valorisation des gisements exceptionnels français – d'une qualité de niveau mondial – auprès du grand public est relativement facile et les retombées culturelles et touristiques bénéficieraient à tout un territoire. Il en est de même avec nos collections qui possèdent en leur sein des échantillons/

spécimens uniques qui pourraient être pleinement valorisées et préservées avec un soutien accru du CNRS. Sur ces thématiques d'étude, une co-production de données via les sciences participatives peut être envisagée en prenant entre autres l'exemple de comptages régionaux de pollens via la mise à disposition du grand public de pièges à relever régulièrement.

Enfin, puisque l'étude du passé peut nous éclairer sur le fonctionnement du système Terre en général et du système climat-géo-biosphère en particulier et peut apporter des éléments importants pour comprendre et mettre en perspective les répercussions des perturbations anthropiques actuelles, des communications régulières des résultats les plus saillants vers les décideurs peuvent s'avérer particulièrement importantes.

### DÉFI 5

Le point de départ de l'atelier a été le constat, dans les perspectives précédentes, d'un manque de lien fluide entre chercheurs et grand public dans la communication en situations de crise. D'un côté les chercheurs relèvent le défi

de communiquer sur des événements caractérisés par une forte incertitude et une faible probabilité mais de fort impact sur la population. De l'autre, le public et les media désirent une information rapide, simple et directe. L'atelier a permis d'identifier trois axes principaux pour améliorer la communication sur les risques :

- Pérenniser les formations pour chercheurs sur le modèle « media training » et créer des opportunités pour les journalistes de se former aux questions que se posent les scientifiques (et les défis que cela implique). Ceci implique de reprendre les modèles de formation existants et créer des journées de formation qui s'inscrivent dans la continuité. Ces propositions ont conduit à réfléchir à la formation de « super-scientifiques », c'est à dire des médiateurs ou chercheurs formés à communiquer sur plusieurs sujets à la fois, le plus rapidement, clairement et précisément possible.
- Créer une liste d'experts scientifiques INSU prêts à communiquer sur un risque spécifique et se servir davantage de cette liste en situation de crise. À noter que le terme « spécialiste » a été préféré à celui d'expert, plus employé mais moins approprié pour les chercheurs.
- Restructurer la gouvernance dans la communication du CNRS. Les chercheurs, qui sont pourtant souvent sollicités à communiquer sur plusieurs types de risques, devraient avoir un cadre clair et précis pour savoir quand communiquer au nom de l'OSU/UMR et/ou de l'INSU ou du CNRS. Il faudra également proposer des infrastructures et protections juridiques claires pour les chercheurs exposés aux attaques médiatiques et aux *fake news*.

Enfin, les participants à l'atelier demandent de trouver des instruments efficaces pour valoriser l'investissement des chercheurs dans la communication des risques. Ces actions sont actuellement peu valorisées même si elles demandent un investissement personnel qui va souvent au-delà des horaires de travail standard et peut donc interférer avec la vie privée.

### Spécificité de la gestion de crise

La synthèse des réflexions prospectives existantes révèle une assez grande disparité dans la prise en compte de ces problématiques selon les communautés de l'INSU. Sans surprise ces réflexions sont quasiment absentes de la prospective AA. La contribution attendue de la communauté OA se résume globalement à la fourniture au public et aux décideurs d'informations sur lesquelles puissent s'appuyer leurs décisions et la définition de politiques publiques. La communauté TS, de son côté, a spécialement concentrée son attention sur la question de la crise et en particulier de la communication des scientifiques en période de crise, en reprenant notamment à son compte des recommandations du groupe de réflexion « gestion de crise et expertise » du COMETS. C'est la prospective SIC qui reprend le plus à son compte l'implication nécessaire du scientifique dans le débat public qu'il doit éclairer, en développant notamment des approches intégrées permettant de scénariser l'impact de différentes politiques publiques (en particulier pour ce qui concerne la problématique des événements extrêmes, des aléas et des risques), au-delà du rôle qu'ont à jouer les communautés scientifiques pour la

production de connaissances objectives en appui à l'élaboration de l'action publique.

Au-delà de cette disparité de positionnement des communautés vis-à-vis de ces questions de crise et d'accompagnement des politiques publiques de façon plus générale, cet accompagnement peut prendre une grande variété de formes et se situer à différentes étapes du cycle de vie des politiques publiques en question. Cette grande diversité rend sans doute difficile l'identification précise par les chercheurs, de leur contribution réelle à l'appui aux politiques publiques. Cela pourrait pour partie expliquer le peu de discussions au sein de cet atelier et par conséquent le peu de réponses aux questions qu'il avaient soumises à l'assemblée, à savoir :

- Dans le cadre de sa prospective, est-ce que l'INSU est prêt à se positionner sur l'accompagnement des politiques publiques, en allant au-delà de sa fonction essentielle sur la connaissance des processus, seul ou avec d'autres instituts, d'autres partenaires, et selon quelles modalités ?
- Comment rendre visibles les données produites par l'INSU et les possibilités qu'elles offrent, pour les intégrer dans des dispositifs de gestion de crise, ou plus largement d'accompagnement des PP ?

### DÉFI 6

- La formation : Éducation à la ressource / ressources stratégiques ;
- Il existe un manque de compréhension de la place de ces filières dans le développement de nos sociétés ;
- Les français n'ont pas l'idée de notre presque totale dépendance pour tous les métaux du quotidien : problème de souveraineté et de maîtrise de notre devenir, même si presque plus d'industries dans le domaine. Si France veut être leader dans transition, cela passe par un très fort engagement multi-annuel et une politique assumée de relocalisation / re-exploitation des métaux « stratégiques » ;
- Sciences participatives : vers une géologie préventive.

### DÉFI 8

L'objectif de la table-ronde était de réfléchir :

- aux besoins d'offres de formations polaires : l'offre de formations polaires est-elle suffisante ? Faudrait-il améliorer cette offre de formation ? Est-il judicieux d'envisager des formations multidisciplinaires ? comment pourraient-elles être créées ?
- à la diffusion de l'information scientifique polaire. Comment l'expertise polaire pourrait-elle être mise en avant ? Comment pourrions-nous mieux valoriser et diffuser les résultats de la recherche scientifique polaire ? Devrions-nous concevoir et produire des documents à partir des travaux de recherche afin de mettre en valeur les travaux des chercheurs polaires ?

Les participants ont constaté notamment que :

- Il existe en France des formations polaires
  - des modules ou des options existent parfois dans des licences/masters
  - une approche multidisciplinaire est parfois retenue : par

exemple Master 2 parcours Arctic studies ; UE multidisciplinaire (géosciences, physique, biogéochimie et écologie) à l'IUEM dans le cadre de l'International Antarctic Institute)

- certaines formations sont le fait de formations reconnues par l'État (universités, grandes écoles) et que d'autres peuvent être organisées en dehors d'un cadre universitaire (par des associations de professionnels ou des initiatives privées voire individuelles)
- l'offre de formation n'est pas toujours mise en avant : les formations polaires ne sont pas toujours suffisamment affichées par les universités (difficulté de connaître l'offre de formation)
- des formations de type séminaire intensif ou école d'été sont organisées
- les formations polaires sont réparties sur le territoire français, elles sont souvent le fait d'initiative du rattachement à des enseignants-chercheurs dans des laboratoires
- Les journalistes, le monde enseignant, le grand public sont à la recherche d'informations fiables (caution scientifique), or :
  - les chercheurs ne savent pas mettre en avant leurs compétences, certains communicants peuvent alors profiter de la place ainsi laissée et diffuser de l'information qui ne repose pas sur une étude scientifique préalable.
  - Il est demandé aux chercheurs de publier dans des revues spécialisées qui sont peu accessibles aux non spécialistes, d'autant plus que l'anglais est souvent employé.
  - Le monde scientifique polaire est peu organisé.

Différentes propositions ont été faites :

- En matière de formation
  - Réfléchir à l'intérêt d'une formation polaire. Quel est l'objectif recherché, a-t-on besoin d'une formation polaire ?
  - Le polaire ne serait-il pas une niche vers laquelle il pourrait être difficile de conduire les étudiants ? il serait intéressant d'identifier les compétences requises (par exemple, a-t-on besoin d'un biologiste généraliste avec compétence polaire ou d'un spécialiste polaire ?)
  - Proposer de former des étudiant avec une hybridation de leurs savoirs, pour former des professionnels capables de travailler en interdisciplinaire, à développer des compétences
  - Des moyens financiers et en moyens humains sont nécessaires pour monter de nouveaux projets de formation ou de renforcer l'offre de formation
- En matière de diffusion de l'information
  - De participer à la mise en réseau des chercheurs polaires français
    - . En participant au recensement du potentiel de recherche français en milieu polaire et subpolaire (possibilité de répondre à un questionnaire en ligne : <https://survey.cnrs-dir.fr/index.php/117168>)
    - . En participant aux associations savantes existantes. Il n'est pas nécessaire de créer de nouveaux réseaux, mais de renforcer les réseaux existants, comme celui organisé au sein du Comité National Français des Recherches Arctiques et Antarctiques (CNFRA). Le CNFRA est le représentant français au SCAR. Le CNFRA organise chaque année des journées scien-

tifiques multidisciplinaires (<http://www.cnfra.org/16emes-Journees-Scientifiques>)

- . En partageant des retours d'expérience au sein de laboratoires, de programmes européens ou internationaux qui ont su mettre la vulgarisation des travaux de recherche comme un des objectifs des programmes
- Prendre le temps de procéder à une vulgarisation des travaux de recherche,
  - . même si un ouvrage n'est pas valorisé au niveau scientifique, il permet de mettre en avant des résultats de recherche
  - . écrire des articles de vulgarisation pour le site The conversation (<https://theconversation.com/fr>). Pour être publié, il est néanmoins nécessaire d'être actuellement employé comme chercheur ou universitaire dans un établissement d'enseignement supérieur ou de recherche membre de l'association
  - . chercher à publier en français
- S'afficher en tant que chercheur (par exemple proposer d'être inscrite dans l'annuaire des femmes expertes françaises et francophones sur le site Les Expertes-France - <https://expertes.fr/>)
- Former des scientifiques qui pourraient devenir des médias-référents dans différentes disciplines. Ces formations pourraient permettre de faire passer efficacement des messages dans les médias et de développer des compétences en stratégie médias.

## DÉFI 10

- Rendre compte des différents travaux, faire découvrir des écosystèmes
- Interagir avec le public, les gestionnaires et les entreprises pour tenir compte de co-activités mais aussi définir de nouvelles réglementations
- « Ici commence la mer » sur les chasses d'eau

## DÉFI 16

### Comment communiquer en cas de crise ?

Cette table ronde a permis aux participants de prendre conscience de l'importance d'une communication adaptée auprès de chaque public. Ce temps de travail a permis également de réaliser que la prise de parole en public ne peut s'improviser et nécessite, notamment pour les sujets les plus critiques, une formation spécifique, à la fois pour savoir donner un message ajusté et pouvoir être armé de façon appropriée pour répondre aux questionnements des médias et du public.

### Comment diffuser et vulgariser vers le grand public ? (TR3)

Deux constats évidents apparaissent : c'est une mission CNRS, personne n'en doute et la majorité aime transmettre et diffuser vers le grand public. Il y a cependant un réel problème de temps et de reconnaissance de cette activité dans les dossiers de carrière des agents.

### 3. Sciences participatives : co-production de connaissances et co-construction de solutions



Marcel DALAISE / IMPMC / CNRS Photothèque

#### DÉFIS 3 ET 4

L'étude des grandes crises peut faire l'objet dans une certaine mesure de pratiques de sciences participatives, en particulier la collecte de fossiles par des amateurs éclairés, qui peuvent fournir des archives aux chercheurs pour des études paléontologiques ou géochimiques, même s'il s'agit là d'une vision plus contrainte de la recherche participative.

#### DÉFI 5

Ainsi qu'il est mentionné dans le très complet rapport de François Houillet publié en 2016 et disponible sur <http://www.sciences-participatives.com/>, les sciences participatives sont des formes des productions de connaissances scientifiques auxquelles des acteurs non scientifiques professionnels – qu'il s'agisse d'individus ou de groupes – participent de façon active et délibérée. Grâce notamment à l'avènement de l'ère numérique, leur développement s'est considérablement accru au cours des dernières décennies. Le nombre des ressources disponibles, des portails d'accès à des projets en ligne, visant des publics de plus en plus divers et couvrant des thématiques de plus en plus nombreuses, fleurissent un peu partout sur la toile.

La thématique des sciences participatives a ainsi cela d'original qu'elle bénéficie à la fois d'un retour d'expériences important, alors qu'elle n'en est certainement qu'aux premiers stades de son développement. Les discussions au cours de l'atelier de prospective ont donc porté à la fois sur les expériences effectives des participants et sur ce qui est souhaitable pour l'avenir.

Il se confirme que les sciences participatives, en associant soit des observations nombreuses soit des acteurs nombreux, sont des opportunités de recherche et/ou de diffusion de la culture scientifique, d'interactions entre la recherche et le grand public, dont le développement doit être soutenu.

- La question des financements est cruciale: de nombreuses branches professionnelles sont concernées (infographie, sciences de l'éducation...), il peut être fait appel à des prestataires de service pour l'animation des communautés (et des liens entre elles), la pérennisation des outils (numériques, mais pas seulement) et bases de données.
- À l'heure actuelle, hors exception, bien peu de projets en sciences participatives sont éligibles aux différents appels d'offre émis par les tutelles des laboratoires; le développement des relations entre le monde de la recherche et le monde de l'éducation et de la médiation scientifique devrait, de ce point de vue, être largement soutenu.
- Les récents projets menés en astronomie ou en environnement (et cela concerne aussi tous les champs discipli-

naires) montrent qu'il est encore nécessaire de convaincre professionnels et amateurs de l'intérêt à collaborer, car là aussi complémentaires, sur nombre de projets.

- Pour une pleine efficacité, les projets de sciences participatives devraient davantage s'appuyer sur les communautés (hors INSU) de chercheurs et d'enseignants dont c'est le métier principal. Les travaux menés de longue date en SHS sur les protocoles et aspects règlementaires en sciences participatives en sont un exemple : les projets doivent être construits avec les bons partenaires associés aux bons moments.

Il faut aussi noter que la pérennité des programmes est très souvent fragile, car ils dépendent de la volonté ou de la disponibilité d'un tout petit nombre de personnes.

Les recommandations du groupe sont les suivantes :

- La mise au point des projets de sciences participatives doit associer les différentes compétences nécessaires et complémentaires très en amont, en associant différentes communautés scientifiques et du monde de l'éducation, et peut être aussi des responsables/gestionnaires dans les collectivités ;
- Le besoin en formations sur les sciences participatives sur ces différents métiers complémentaires et à différents niveaux est criant ; l'une des possibilités est de s'appuyer sur les organismes et Universités (y compris au niveau européen) ayant déjà une culture participative assez développée ;
- Des financements fléchés sur les sciences participatives, et donc inter-organismes même quand une coordination INSU est possible, sont attendus, et en particulier dans les domaines suivants : ressources humaines, instruments (acquisition et maintenance), outils, valorisation.

Une grande partie des recommandations formulées dans le rapport de François Houillet sont encore à mettre en œuvre, ou à étendre dans de très grandes proportions.

## DÉFI 8

La question de l'agrégation des sources de savoir a fait l'objet d'une longue discussion après des présentations proposées à l'assemblée. Il ressort de ces discussions que si la construction de savoir devient un thème récurrent des AAP de recherche, c'est aussi une question d'éthique. Le savoir de l'expérience dépasse d'ailleurs le simple cadre des populations autochtones mais peut aussi impliquer à la société civile, les industriels ou les personnes chargées de l'organisation et la logistique des expéditions polaires (IPEV-Antarctique).

Il ne s'agit pas seulement d'obtenir un financement puis d'aller démarcher les populations, le projet doit être co-construit en amont. Les résultats de ces collaborations sont parfois surprenants, il n'y a pas toujours adéquation en ce que perçoivent les scientifiques et les populations, d'où la nécessité de cette co-construction qui garantit un fonctionnement fluide des projets de recherche.

Les enjeux sont aussi méthodologiques :

- Nécessité d'une approche éthique, d'un questionnement de nos pratiques, de concevoir des co-constructions sur un temps long afin de favoriser l'émergence de nouveaux savoirs.
- Ces approches transdisciplinaires se heurtent parfois à un système français qui est plus basé sur le disciplinaire que le transdisciplinaire. Peu de master favorisent par exemple ces approches et les ED sont très disciplinaires et parfois réticentes aux approches transversales.
- Les démarches pour intégrer les savoirs non académiques varient d'un pays à l'autre. Le protocole pourrait être réfléchi de manière internationale.
- Lorsqu'il s'agit de co-construction de recherches et co-construction d'une information (données mises à disposition...), il est parfois nécessaire d'objectiver la partie de cette donnée et donc de s'interroger sur la manière d'extraire une information objective de ce savoir non académique.

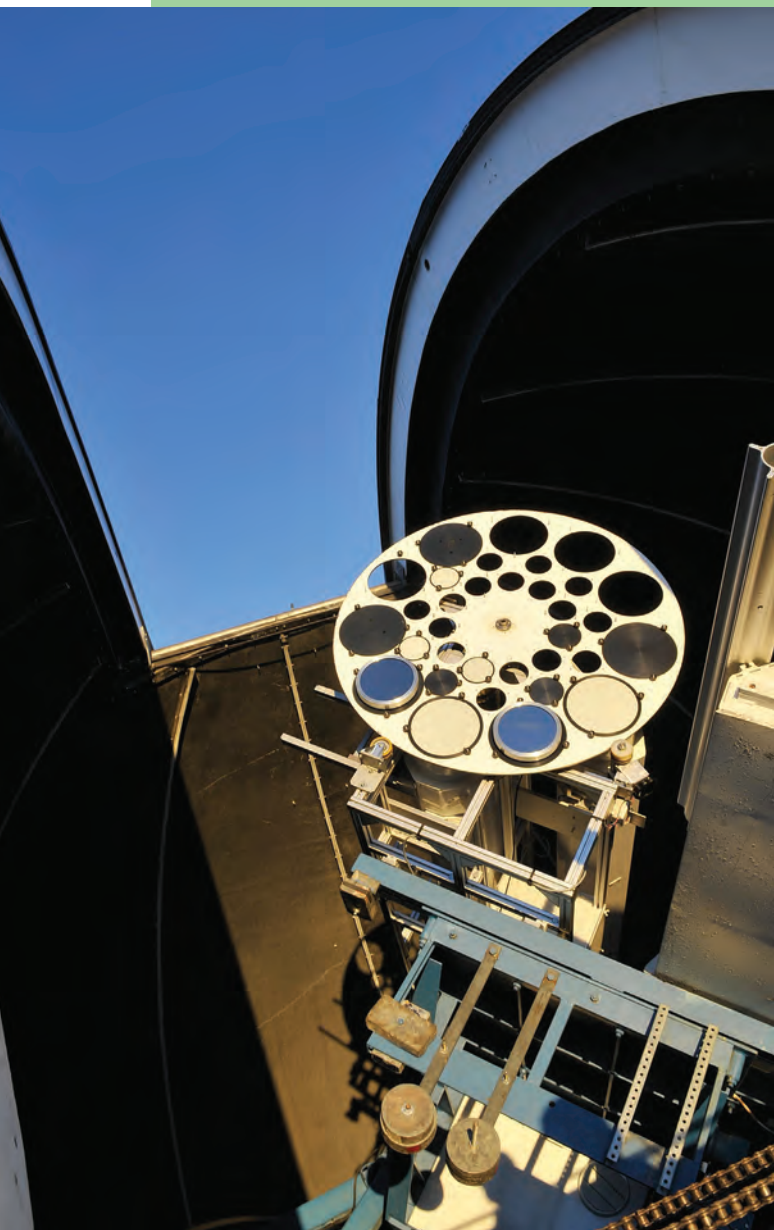
À l'interface SHS/INSU, l'utilisation de d'instrumentation et de capteurs peut mener à la mise en place de sciences participatives, par exemple les mesures et de relevés quotidien, les prises de photo peuvent être réalisés par les populations autochtones avec les téléphones portables. Il faut ensuite mettre en place des réseaux de transmission des données (via site internet ou autre). Cette contextualisation des données peut passer par la mise en place de protocoles s'inspirant par exemple de ce qui se fait en écologie.

La recherche française se démarque par une absence de structures pérenne du type conseil polaire français. Le CNFRA pourrait jouer ce rôle, il y a besoin de colloques ambitieux et récurrents. L'idée d'un Polarathon qui favoriserait la présentation de différents projets de différents instituts dans le but de faire émerger de nouvelles thématiques a été abordée. Au-delà de l'Arctique, la question de la mise en commun des savoirs académiques et non académique est une problématique qui touche de nombreux secteurs de la recherche.

## DÉFI 14

Les sciences participatives sont clairement en développement. Les données qu'elles fournissent peuvent cependant être très diverses et de qualités inégales. Là encore, il est absolument nécessaire de faire des choix. Il est suggéré de chiffrer les coûts globaux de ce que pourrait représenter la gestion de ces données et d'identifier des exemples afin d'être le plus transparent possible. En parallèle, il est possible de disséminer auprès du grand public les méthodes scientifiques sur des vraies données scientifiques, un enjeu critique dans la période actuelle. Les outils utilisés par les scientifiques et développés pour les communautés INSU peuvent parfois être aussi utilisés par les amateurs et le grand public.

## 4. Liens avec l'industrie



Cyril FRESILLON/OMP - Observatoire du Pic du midi/CNRS Photothèque

### DÉFIS 3 ET 4

Les liens avec l'industrie sont généralement les plus visibles dans les questions relatives aux ressources. Comprendre la formation des géoressources ou les propriétés d'un réservoir est un objectif partagé avec l'industrie. Il implique l'étude des cycles biogéochimiques, des processus diagénétiques (évolution des propriétés des réservoirs) et plus largement de l'évolution des environnements de dépôt et des écosystèmes. Ainsi, les interactions avec les secteurs industriels et socio-économiques peuvent être liées: aux ressources pétrolières (accumulation de matière organique dans les événements d'anoxie océanique), aux dépôts de certains métaux (grands événements d'oxygénation et dépôts de Mn en Afrique du Sud) mais également à la caractérisation des réservoirs sédimentaires non carbonés (géothermie, stockage profond de CO<sub>2</sub>, ressources en eau ou en sable par exemple, qui peuvent aussi se traduire par des demandes d'analyses d'entreprises ou de bureaux d'études). Il doit être possible de valoriser les liens avec les entreprises avec impulsions des tutelles pour développer des projets, par exemple via des soutiens avec des bourses CIFRE. Sur ces liens avec l'industrie, une continuité existe avec les défis 6 et 7.

De manière générale, toutes les études portant sur les interactions climat-géo-biosphère sont indispensables pour comprendre les conséquences du changement climatique en cours, mais également des pollutions liées à l'exploitation des minerais (pollutions aux métaux lourds lors d'épisodes volcaniques, par exemple), la disparition en masse des insectes ou l'effondrement des chaînes trophiques, qu'elles soient terrestres ou océaniques (perturbations des écosystèmes lors de crises anciennes). Ces études peuvent donc aider dans le cadre des remédiations post-pollution et de nombreux outils sont d'ailleurs partagés (par exemple, demande d'analyses isotopiques par des bureaux d'études). Une possibilité de transfert d'innovations et d'expertise dans le domaine des biominéralisations et de solutions biologiques pour la reconquête efficace et stable de milieux détruits par les activités anthropiques existe également.

Des partenariats avec l'industrie peuvent également être mis en place à l'occasion de développements méthodologiques, notamment instrumentaux.

## DÉFI 6

### Le cycle des matières premières depuis l'exploration jusqu'au recyclage

Des recherches apparaissent absolument nécessaires à de nombreuses interfaces entre géosciences, sciences de l'ingénieur et chimie pour optimiser, et réduire l'impact environnemental (consommation d'énergie et d'eau, rejet de gaz à effets de serre) lors de l'extraction et la séparation. Le lien avec l'industrie extractive dans ces domaines est évident. Cependant, l'aspect prédictif en phase exploratoire reste encore plus un objectif qu'une réalité: il faudrait cibler plusieurs démonstrateurs sur lesquels l'industrie minière est active et valider des démarches de prédictivité sur des bases de données (hydro/géochimiques/pétrophysiques/géophysiques...) partagées par toute la communauté académique/R&D indus. (YB); importance des sites pilotes partagés par la communauté scientifique et l'industrie (cf l'importance du site pionnier de Soultz- sous-Forêts).

Ces enjeux sont maîtrisés par une communauté qui a des liens historiques avec les industriels car travaillant en grande partie sur des objets cibles des industriels). Toutefois des inquiétudes structurelles existent du fait d'un nombre d'industriels français du secteur très faible, même si quelques leaders mondiaux sont encore actifs (U [Orano], Ni [Eramet], minéraux industriels [IMERYS], Gaz et pétrole [Total]). Toutefois, sur la problématique de la transition énergétique, il existe un gisement de nouveaux partenariats avec de nombreuses industries au niveau mondial.

Certains sites de recherche français (Nancy, Orléans) ont la capacité de gérer l'ensemble du cycle (exploration – recyclage) et devraient donc être attractifs au niveau mondial pour les industriels (tout en un) mais cela ne s'avère pas vrai dans les faits: pourquoi?

La recherche partenariale est donc à encourager en invitant à la fois recherche fondamentale et appliquée (ASAM).

## DÉFI 10

- Co-activité: chercheurs, gouvernance, entreprise.
  - Comment gérer des infrastructures et aménagements sur le continuum (cas des éoliennes en mer).
  - Comment faire évoluer une réglementation par rapport à cela.
  - Cycles de vie de ces infrastructures, dimensionnement pour résister aux événements extrêmes (Fukushima, dépassement d'ouvrages d'assainissement...)
- Lien avec les sciences des procédés et entreprises de ferme, sciences agronomiques et exploitations agricoles intrants du continuum
- Développement méthodologique de capteurs
- Pratiques de production / utilisation et modes de consommation. Chaîne de production-consommation des *chemicals*.

## DÉFI 14

Le lien avec l'industrie a été abordé autour des questions de la valorisation des données, mais aussi sur la souveraineté des données auxquelles on accède, avec des inquiétudes liées aux possibilités de moissonnage des grands acteurs de type Google. À l'opposé, les acteurs de l'industrie du numérique (GAFAM, fabricants de serveurs, d'ordinateurs, etc.) pourraient trouver un intérêt en amont à certains projets de recherche pour développer leurs compétences, comme cela se fait pour le calcul intensif. Lors des collaborations entre la recherche et l'industrie, la question des accords ou *memorandum of understanding* est critique. Les outils actuels du CNRS et des universités ont des délais trop longs ou sont trop complexes. On note un besoin fort d'avoir des clarifications sur les aspects juridiques qui soient disponibles et qui ne soient pas au cas par cas. Alternativement, il semble nécessaire de faciliter l'accès aux informations sur les cas particuliers pour les disciplines pour lesquelles ce point est critique. Il est proposé qu'il y ait une concertation entre les services juridiques des établissements de manière à déboucher sur une charte ou un guide<sup>1</sup> pour fluidifier le système. Le document devra être synthétique pour rester lisible.

## DÉFI 17

Les liens avec l'industrie peuvent se situer à plusieurs niveaux:

- Collaboration avec les constructeurs de calculateurs: c'est par exemple le cas du « contrat de progrès » où HPE a apporté une expertise pour l'utilisation des GPU. D'autres cas existent également par exemple sur le code NEMO avec ATOS-Bull
- Collaborations avec des développeurs de logiciels: à confirmer
- Utilisation des codes ou des résultats de simulation par des PME ou entreprises: par exemple des sociétés de services utilisant les résultats des simulations climatiques de référence, l'utilisation des NEMO et LMDZ par des PME.

1- Le guide juridique sur l'ouverture des données tel que proposé par l'INRAE ou l'INSERM (<https://prod.inrae.inrae.fr/ft?id={C7D38E14-877E-4883-AB91-0536DD4D63B9}&original=true>) pourrait servir de point de départ.

# Conclusions

Alors que nous entrons dans la 3<sup>e</sup> décennie du XX<sup>e</sup> siècle, l'année terrible qui vient de s'écouler montre combien nos sociétés ont besoin de plus de science, plus impliquée, plus expliquée, plus proche des décideurs et des porteurs d'enjeux, mais toujours construite sur l'excellence, le temps de la recherche et la liberté de défricher de nouveaux horizons. Transversalité, interdisciplinarité, temps long, instrumentation, calcul et données... grâce aux pistes tracées par cette prospective l'INSU poursuivra son engagement résolu pour les communautés des sciences de l'Univers et de la planète, pour les accompagner toujours plus loin dans leurs rêves scientifiques.

# 1. Un premier exercice réussi

Globalement, ce premier exercice s'est concrétisé par une adhésion remarquable et un intérêt certain pour les discussions inter-domaines de l'INSU, et ce malgré la situation sanitaire particulièrement difficile de 2020. Près de 1000 ingénieurs et chercheurs se sont impliqués dans cette prospective transverse au travers de l'animation réalisée par les OSU qui ont confirmé à cette occasion leur capacité à construire le débat interdisciplinaire entre les communautés de l'INSU. Ce rôle clé d'animation des OSU doit être valorisé et renforcé pour que les échanges entre communautés se poursuivent de façon durable à l'échelle de chaque site. Cette articulation entre dynamique régionale et nationale est une des forces principales de l'INSU.

En détails, et on le voit dans la synthèse précédente, les défis ont livré des corpus de maturité différente par la nature même des questions abordées, mais aussi des concepts discutés :

- les défis scientifiques (1-7) font ressortir des questions scientifiques ambitieuses à travailler entre les domaines et des propositions d'organisation concrètes à analyser et, pour certaines à mettre en œuvre rapidement ;
- les défis géographiques (8-11) d'une ampleur remarquable devront être retravaillés pour préciser et prioriser avec l'ensemble de nos partenaires, organismes et université, les périmètres et les outils de déclinaison nécessaires ;
- les défis technologiques et méthodologiques mettent en avant un besoin fort de transversalité dont l'INSU doit s'emparer pour anticiper la prochaine décennie.

Outre l'appétence démontrée par toutes les communautés pour ces forums inter-domaines sur les grands défis qui se posent à nos communautés, il apparaît clairement que les programmes nationaux devront assurer plus encore des missions d'incubation et d'interdisciplinarité qui ne sont pas toujours au cœur de leur fonctionnement actuel.

Une autre conclusion forte, qui ressort de quasiment tous les défis, est le rôle central de l'instrumentation innovante dans l'excellence des recherches menées à l'INSU et le besoin de revitaliser les actions de l'Institut en ce sens en les rendant plus transversales et en leur donnant une stratégie et des moyens dédiés.

Enfin, les enjeux de la donnée et du calcul, tant ensemble que pris séparément, ne sont plus seulement suffisants mais nécessaires à l'excellence de nos recherches, voire à leur développement. Que ce soit l'appropriation du *big data*, la gestion de l'hétérogénéité des données et de leurs sources, l'apport de l'IA et du HPC à la validation, au traitement et à l'interprétation de la donnée, ou les opportunités incroyables de *l'exascale* pour les simulations complexes, l'Institut doit investir rapidement sur tous ces enjeux qui sont aussi essentiels que l'instrumentation l'est pour relever les défis de demain.

## 2. Implémenter la mise en œuvre des projets scientifiques transverses

Les programmes nationaux, plébiscités par les communautés, doivent poursuivre leur refondation pour gagner en transversalité et en interdisciplinarité, et décliner mieux encore dans leurs objectifs les choix stratégiques de l'institut (prise de risque, valorisation des infrastructures de recherche, déclinaison des prospectives) et les grands sujets identifiés à l'occasion de cette prospective transverse, et notamment :

- la Planétologie comparée en (ré)ouvrant le PNP aux thématiques « Planètes primitives » pour permettre une approche large de cette question et en construisant, via les programmes nationaux et/ou un GDR CNRS dédié, une recherche de long terme sur l'exobiologie. Un tel programme transverse doit impliquer de nombreux acteurs au CNRS. Il ira de pair avec les réflexions menées avec le CNES et nécessaires à la création d'une *European Facility* pour l'accueil d'échantillons extraterrestres.
- la création d'un programme transverse « Ressources du sous-sol, bien commun », incluant les fonds marins, impliquant les études fondamentales de géologie mais aussi (et surtout) les questions des nouvelles technologies, des conflits d'usage, et d'enjeux stratégiques. Ce programme devra être animé conjointement avec le BRGM et l'Ifremer, impliquera nécessairement des acteurs industriels et pourra donner lieu à terme à un Programme et équipements prioritaires de recherche (PEPR) dans le cadre du PIA4, articulé avec le PPR « Océan » pour les fonds marins. Il pourra être préparé dans un premier temps par un colloque de la MITI.
- un programme transverse « risque, aléas et vulnérabilité » impliquant l'Alliance ALLENVi et l'ANR, qui devra, au-delà de la compréhension des aléas, considérer ceux-ci également comme des forçages systémiques aux limites d'un système dans lequel l'exposition et la vulnérabilité sont les grands enjeux de recherche pour lesquels une approche pluridisciplinaire est essentielle.
- faire évoluer les programmes nationaux et élargir le périmètre du GDR « paléo » pour mieux capitaliser sur la richesse de l'approche couplée des diverses profondeurs de temps. L'objectif doit être de combler le fossé entre « pré-quaternaristes » et « quaternaristes », d'accroître la vision intégrée des archives dans toutes les profondeurs de temps, notamment en s'appuyant sur l'observation et la modélisation, et de proposer une stratégie de conservation des données paléo en lien avec les pôles de données existants et les futurs entrepôts de données thématiques.

La prospective a également mis en évidence les limites actuelles de l'appropriation des ODD par les communautés scientifiques dans leurs objets de recherche. Il sera important de participer fortement à la naissance des sciences de la durabilité liant dans un même corpus les différentes

recherches associées à la transition environnementale, et d'être force de proposition, comme l'est par exemple le PPR « Océan », de programmes transverses dédiés à une approche résolument interdisciplinaire des enjeux mis en lumière par les ODD.

La coordination nationale de recherches centrées sur de grands chantiers géographiques a fait en ce sens les preuves de son efficacité scientifique et de sa capacité à décloisonner les communautés. Cette dynamique doit se poursuivre et la prospective a dégagé quatre milieux prioritaires sur lesquels la réflexion doit se poursuivre :

- le milieu urbain qui s'intégrera au défi du COP du CNRS « Territoire du Futur ». Un chantier dédié structurera la communauté de recherche à l'INSU, au CNRS et avec les universités et les organismes concernés. Un co-pilotage de cette initiative sera proposée à l'Université Gustave Eiffel (lien avec l'ODD 11) ;
- la zone intertropicale et les Outre-mer à travers plusieurs cibles possibles à clarifier avec nos partenaires : en domaine continental (Afrique, Amérique du Sud...) en s'appuyant sur la communauté « AMMA » mobilisée avec la volonté d'étendre à la communauté SIC et à l'INEE, et en milieu insulaire où il reste à structurer la communauté (liens avec ODD 13 et ODD 6) ;
- Les milieux polaires pour lesquels il est essentiel d'aligner la stratégie nationale sur la stratégie européenne en cours de définition et d'implémentation (EU-Polarnet I et II). Au-delà du maintien essentiel des infrastructures de recherche en Antarctique et de l'accès aux moyens « logistiques », il faudra construire un « consortium » avec les principales universités polaires et le CNES prêt à s'engager sur la durée pour définir cette stratégie nationale et la mettre en œuvre ;
- Le continuum terre-mer, pour lequel la réflexion se poursuit sur la base de la dernière prospective menée dans le domaine SIC. Un enjeu fort sera l'intégration des observatoires socio-écosystémiques le long du gradient terre-mer, en choisissant des « hot spots » à la fois systémiques et prioritaires pour les porteurs d'enjeux et les partenaires. Ces sites pilotes pourraient être intégrés aux Zones Ateliers de l'INEE (ou en proposer de nouvelles si nécessaire) en interaction avec les SNO de l'INSU, si possible via l'animation d'un OSU pilote. Le lien continent/littoral doit être travaillé pour être porteur au niveau européen des liens entre les ESFRI (ou projets) ILICO/eLTER/Danubius (lien avec ODD 14).

### 3. Soutenir l'instrumentation, l'innovation technologique et l'intégration de l'observation

Afin de développer une plus forte transversalité du développement de l'instrumentation innovante à l'INSU, une nouvelle direction adjointe scientifique sera créée et adossée à une commission spécialisée transverse à parité CH/IT, incluant des représentants des commissions spécialisées des domaines, et disposant d'une dotation annuelle pour animer et soutenir l'innovation via les appels à projets de la division technique de l'INSU voire un programme dédié...

La division technique sera réaffirmée, dans ce cadre, dans son rôle de bureau d'études technique et comme un acteur majeur des choix et des développements priorités par la commission spécialisée transverse, notamment sur les technologies de base, l'ingénierie générique innovante (sobriété

énergétique, nanosats, télécommunications...), l'intégration des plateformes instrumentées. La nouvelle commission spécialisée transverse conduira un inventaire des moyens techniques/technologiques/analytiques (notamment de test et de calibration) des laboratoires et des partenaires industriels au travers d'un recensement organisé par les OSU, ainsi qu'une réflexion sur le rôle et l'organisation des outils labélisés liés à l'instrumentation : parcs, instruments nationaux, site instrumentés, plateformes...

Cette évolution ira de pair avec l'animation renforcée de la communauté au travers des Ateliers Expérimentation-Instrumentation (AEI), ainsi que la formation et le partage de compétence via les réseaux métiers.

### 4. Être le moteur de l'écosystème national de la donnée en SDUE

L'INSU doit être force de proposition dans l'organisation du paysage, la construction des outils et les recommandations aux communautés pour la pérennisation et l'ouverture de leurs données. Il peut pour cela s'appuyer sur une expertise reconnue et des dispositifs à l'efficacité démontrée comme le CDS ou en construction comme Dataterra. Au-delà du nécessaire inventaire des outils et structures existantes ou des compétences et profils indispensables, il faudra une action très volontariste pour doter les pôles/plateformes logicielles de services à la donnée des moyens nécessaires d'ici 5 ans pour développer les entrepôts de données et les outils associés. Il faudra construire un plan de recrutement ambitieux (*Data Scientists, Data Managers, Data Stewards* théma-

tiques, *Data Analysts* en centres de calcul...) et coordonné en inter-organismes, notamment via une Commission Inter-Disciplinaire (CID) dédiée au CNRS. L'INSU peut prendre une place importante pour promouvoir une telle organisation au niveau européen, notamment via EOSC.

Pour appuyer et structurer cet effort, l'INSU se dotera d'une « Mission Données et Science Ouverte » en lien direct avec la direction afin :

- d'organiser la concertation verticale (labo/OSU/IR) et horizontale (instituts CNRS, partenaires extérieurs) ;
- de proposer une organisation de l'écosystème et une instance de réflexion permanente dans la communauté ;
- de créer un espace de travail et de prospective liant les aspects techniques et juridiques ;
- d'organiser un réseau « Données et Science Ouverte » avec les référents à nommer dans chaque OSU.

## 5. Être le promoteur d'un écosystème national de recherche et formation du HPC, à l'interface avec les données

Afin d'aider les communautés à se préparer aux défis numériques en modélisation et simulation, l'INSU doit animer une Action Nationale transverse sur le HPC dotée de moyens dédiés, visant à développer une stratégie nationale face aux enjeux de l'*exascale*, et en particulier de :

- Développer une expertise spécifique et partagée autour des simulations et modélisation numériques pour la recherche pour profiter au mieux, dans toutes les communautés, des nouvelles architectures *exascale*, notamment pour l'adaptation des codes ;
- Accompagner l'évolution du HPC pour l'IA dans le lien calcul/assimilation ;
- Appuyer le développement de solutions communautaires avec une reconnaissance des missions sur les enjeux HPC.

Le HPC est aussi, avec l'IA, un pilier majeur dans la gestion des flux de données massives et hétérogènes. Il convient

donc de développer dans la communauté une compréhension commune des enjeux HPC/cloud/IA/HPDA « *physics driven* » et « *data driven* » afin de :

- Soutenir formellement les interactions entre les communautés d'observations et les communautés modélisation et simulation, en menant annuellement des ateliers techniques autour des outils d'intégration et d'utilisation des données, en lien avec les actions en ce sens dans les domaines ;
- Appuyer des « *case study* », notamment via les « *digital twins* » qui seront des test idéaux d'intégration entre données et modèles.

Pour appuyer et structurer cet effort, l'INSU se dotera d'une « Mission HPC et IA » inter organismes permettant à la communauté de structurer ses actions en lien fort avec le plan HPC national et le GENCI.

© Cyril FRESILLON / IDRIS / CNRS Photothèque



## 6. Être ressource...

L'INSU doit être une ressource pour ses communautés, ses partenaires, les porteurs d'enjeux et notamment les pouvoirs publics. Cela concerne l'information scientifique fiable que nous devons mettre à disposition, la recherche de nouvelles formes de partenariat, mais aussi notre propre recherche réflexive sur l'évolution de nos pratiques pour réduire notre impact environnemental.

La recherche collaborative avec les acteurs industriels est un puissant ressort d'innovation. L'INSU pratique déjà cette co-construction avec notamment un retour d'expérience positif sur les Laboratoires Communs. Mais il est nécessaire de développer encore, au sein de nos laboratoires, la culture d'innovation et de valorisation des recherches amont, en clarifiant les mécanismes d'accompagnement (et le rôle des différents acteurs), en formant et en informant les chercheurs sur ce qu'est l'innovation (processus, PI, entrepreneuriat...) et les ressources qui s'offrent à eux (prématuration...). Ce sera le rôle du réseau des référents valorisation des OSU qu'anime la direction adjointe en charge des relations industrielles. Il faut aussi accompagner les chercheurs en Institut, en coordination avec les SPV des délégations régionales, dans la complexité inhérente aux négociations de contrats de recherche et accords de consortium, en particulier pour les projets à multiples partenaires. Dans cette démarche de diffusion et d'appui à l'innovation et à la valorisation, les OSU pourront jouer un rôle important de conseil, orientation, mise en relation, retour d'expérience et de pilotage.

L'INSU doit aussi être la source, et le relai, d'une information scientifique vérifiée et fiable. Cela répond à une demande multiple, qui va de la légitime interrogation sociétale sur les grands défis à la gestion de crise. Il faut aussi, plus largement

montrer comment « on fait la science » et passionner le débat avec le grand public, les acteurs socio-économiques et les décideurs. L'INSU va structurer sa stratégie de communication en s'appuyant sur les scientifiques avec pour premiers objectifs de :

- créer une *task force* « réseaux sociaux » ;
- lancer un appel d'offre annuel « médiation scientifique » ;
- consolider une banque de savoirs CNRS-INSU notamment en mettant plus de ressources en ligne (eg. films, série de Podcasts, MOOC) ;
- pérenniser les compétences et accumuler du professionnalisme via des structures comme l'*Office Climate Education* ;
- travailler à fiabiliser la communication de crise en s'appuyant sur les recommandations du COMETS du CNRS, par exemple en systématisant le système de porte parolat (« parle au nom du CNRS ») rapidement à chaque crise.

Dans cette démarche aussi les OSU devront être des acteurs clefs au service des laboratoires et de l'INSU.

Enfin, si le succès de cette démarche, et notamment la confiance que la société accorde à notre parole, tient d'abord dans la qualité des informations et de la démarche scientifique, elle tient aussi dans la capacité à convaincre, et donc dans la capacité de l'INSU à montrer sa cohérence dans la démarche écoresponsable de la recherche. Il faut prendre en compte l'attente et l'anxiété face au conflit de valeurs en fournissant aux laboratoires l'aide nécessaire dans leur démarche d'évaluation de leur impact et dans le partage de bonnes pratiques, en formalisant notamment une approche bénéfice-risque sur les trajectoires de transition liées aux thèmes de recherche INSU (ex. véhicules électriques/ressources), sans tout centrer sur l'empreinte carbone.

# Annexe

# Recensement de l'implication des OSU sur la thématique des risques

Aléas / risques	Implication des OSU – UMR
<b>1. ALÉAS NATURELS</b>	
<b>1.a Événements météorologiques</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Précipitations extrêmes, sécheresse, vagues de chaleur ou de froid</li> </ul>	<p><b>IPSL</b> – LOCEAN : Événements émergents : les vagues de chaleur marines.  <b>IPSL</b> : Les phénomènes de précipitation : grêle, verglas et neige collante ; évolution des vagues de chaleurs, crues, sécheresses avec le changement climatique ; interactions sécheresses/canicules ; convection dans les modèles atmosphériques ; méthodes probabilistes pour le downscaling et la prédétermination des extrêmes.  <b>OSUG</b> – CEN (CNRM), ETNA (Inrae) : Neige, IGE (pluie; vague de chaleur)  <b>OTELo</b> – LIEC : Effets des vagues de chaleur sur les écosystèmes aquatiques.  <b>Pythéas</b> – RECOVER (Inrae) : Simulation des pluies extrêmes.  <b>THETA</b> – Biogéosciences (Centre de Recherches de Climatologie, CRC) : Vagues de chaleur sous différents climats ; précipitations extrêmes tropicales et extra-tropicales ; interactions tropicales-tempérées ; circulation atmosphérique générant les épisodes de températures extrêmes minimales (gel printanier) et maximales (forte chaleur d'été) dans les régions viticoles.          Ecce Terra - M2C : régimes de temps et crues exceptionnelles</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Rafales de vent au sein des tempêtes, cyclones</li> </ul>	<p><b>IUEM</b> – LOPS : Caractérisation de la structure des vents de surface et de l'interface air-mer dans les cyclones à moyenne et haute résolution (dans l'œil). Étude de l'impact de ces conditions de forçage sur la réponse océanique.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Pannes de vent</li> </ul>	<p><b>IPSL</b> : Les pannes de vent (industrie éolienne).</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Neige, vent et viabilité hivernale</li> </ul>	<p><b>OSUG</b> – ETNA (Inrae), CEN (CNRM), IGE</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Crues soudaines</li> </ul>	<p><b>Ecce Terra</b> – METIS, avec Inrae : Évolution des crues (pas uniquement soudaines) suite au changement d'affectation des terres et au changement climatique.  <b>OSUG</b> – ETNA (Inrae) : Crues torrentielles, IGE : Crue éclair  <b>OSUR</b> – Géosciences Rennes : Modélisation des crues. <b>Pythéas</b> – RECOVER (Inrae) : Modélisation et prévision des crues.  <b>OTELo</b> – LIEC : Remise en suspension, remobilisation des sédiments et des contaminants, effacement d'ouvrages.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Submersions marines</li> </ul>	<p><b>EOST</b> – LHYGES.  <b>IUEM</b> – LETG, LGO, AMURE.  <b>IUEM</b> – LOPS : Observation et modélisation des états de mers en vue d'améliorer la prévision des états de mer extrêmes.  <b>OASU</b> – LIENSs.  <b>OSUR</b> – Géosciences Rennes : Risques de salinisation et d'augmentation de la saturation des nappes d'eau souterraines sur le littoral. <b>THETA</b> – Biogéosciences (CRC) : liens entre submersions, types de temps et anomalies de circulation en Méditerranée.  <b>Pythéas</b> – RECOVER (Inrae) : Modélisation et prévision des crues, érosion littorale et migration dunaire (dunes côtières).          Ecce Terra - M2C. Observations, modélisation physique en canal et modélisation numérique des submersions marines lors d'événements tempétueux. Impact sur le littoral.</p>
<b>1.b Écoulements gravitaires</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Avalanches</li> </ul>	<p><b>OSUG</b> – ETNA (Inrae), CEN (Météo France).</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Glissements de terrain</li> </ul>	<p><b>EOST</b> – IPGS et SNO OMIV.  <b>IPGP</b>  <b>OSUG</b> – ISTerre, ETNA (Inrae).  <b>OSUR</b> – Géosciences Rennes : Modélisation des glissements de terrain, aspects co-sismiques.  <b>OTELo</b> – GeoRessources, CRPG.  <b>Pythéas</b> – RECOVER (Inrae).</p>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crues et laves torrentielles (transport solide et morpho-dynamique des rivières de montagne)</li> <li>• Lahars et écoulements hyperconcentrés</li> </ul>	<p><b>IPGP</b>, dont l'observatoire et sismologique de la Martinique.  <b>IPGP</b>: Obsera - OBServatoire de l'Eau et de l'érosion aux Antilles.  <b>OPGC</b> – LMV (avec Institut Pascal).  <b>OSUG</b> – ETNA (Inrae).  <b>OSUR</b> – Géosciences Rennes: Suivi LiDAR et modélisation numérique, dynamique post-sismique, impact des glissements de terrain.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Éboulements / écroulements rocheux</li> </ul>	<p><b>EOST</b> – IPGS.  <b>OSUG</b> – ETNA &amp; LESSEM (Inrae), ISTerre, EDYTEM (pour le permafrost).  <b>OTELo</b> – GeoRessources.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aléas d'origine glaciaire et périglaciaire</li> </ul>	<p><b>OSUG</b> – IGE, ETNA, ISTerre, EDYTEM (permafrost).</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mouvements gravitaires sous-marins</li> </ul>	<p><b>IPGP</b>: Martinique, et REVOSIMA - Réseau de surveillance Volcanologique et Sismologique de Mayotte.  <b>OASU</b> – EPOC (équipe Sédimento): Écoulements gravitaires sous-marins, dépôts liés à phénomènes telluriques.</p>
<b>1.c Aléas d'origine tellurique</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tsunamis</li> </ul>	<p><b>EOST</b> – IPGS.  <b>IPGP</b>: REVOSIMA - Réseau de surveillance Volcanologique et Sismologique de Mayotte, collaboration avec le BRGM.  <b>OPGC</b> – LMV: Tsunamis volcanogéniques.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volcanisme (actif et récent et approches multi-aléas)</li> </ul>	<p><b>IPGP</b>: Implique en particulier les trois observatoires volcanologiques et sismologiques de l'institut.  <b>OPGC</b> – LMV.  <b>OTELo</b> – CRPG: Signature isotopique géochimique des aléas volcaniques.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aléas sismiques</li> </ul>	<p><b>IPGP</b>: Équipe de sismologie, observatoires volcanologiques et sismologiques, données sismologiques large-bande GEOSCOPE.  <b>OPGC</b>  <b>OSUG</b> – ISTerre.  <b>OTELo</b> – CRPG: Signature isotopique géochimiques des aléas sismiques.  <b>Pythéas</b> – RECOVER (Inrae).</p>
<b>1.d Aléas d'origine spatiale</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Géocroiseurs</li> </ul>	<p>Étude et observation des astéroïdes, mais faible implication dans les actions de défense planétaire.  <b>Obs. de Paris</b> – IMCCE: Observation de géocroiseurs, calcul d'éphémérides, participation à des programmes internationaux de défense planétaire, aux missions HERA et DART; base de données.  <b>OCA</b> – Lagrange: Participation à des programmes internationaux de défense planétaire, aux missions HERA (ESA) et DART (NASA); base de données.  <b>OSUG</b> – IPAG: Instrumentation spatiale (radar), participation à des programmes internationaux de défense planétaire, aux missions HERA et DART.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Météo de l'espace</li> </ul>	<p>Impacts pour la défense militaire, l'aviation civile et les infrastructures terrestres technologiques.  <b>Obs. de Paris</b> – LESIA.  <b>OSUG</b> – IPAG.</p>
<p><b>1.e Aléas composites</b>  (concurrence de plusieurs événements extrêmes ou non, mais susceptibles de créer d'importants dégâts).</p>	<p><b>IPSL</b></p>
<p><b>1.f Aléas en cascade ou en interactions</b></p>	<p><b>IPGP</b>: Séismes, volcans.  <b>OPGC</b> – LMV: Panaches volcaniques, écoulements pyroclastiques, tsunamis.  <b>OSUG</b> – ETNA (Inrae), IGE, ISTerre, EDYTEM: Aléas en milieu montagnard (mouvements gravitaires rapides dans des retenues, laves torrentielles suite à la rupture d'une poche d'eau glaciaire, couplages entre séismes et glissements de terrain, vulnérabilité/ruine des ouvrages soumis à des mouvements gravitaires rapides.</p>

<b>1.g Risques émergents</b>	<p><b>IPSL</b> – Liens entre le changement climatique, la fonte du permafrost, le cycle du carbone, les émissions de gaz à effet de serre.</p> <p><b>OPGC</b> – LMV: Relations entre cendres volcaniques et santé – inhalation, contamination.</p> <p><b>OSUG</b> – IGE, EDYTEM, ISTerre: Dégradation du permafrost (déstabilisation des glaciers rocheux, éboulements/écroulements en altitude), chutes de séracs, ruptures de langues glaciaires, vidanges de lacs glaciaires ou ruptures de poches d'eau glaciaire).</p> <p><b>OSUG</b> – ETNA, CEN, ISTerre: Perturbation (humidification) du manteau neigeux.</p> <p>Ecce Terra - M2C: fonte permafrost et ré-activation de bactéries pathogènes</p>
------------------------------	---

## 2. ALÉAS D'ORIGINE ANTHROPIQUE

• Rejets toxiques ponctuels ou diffus, industriels ou agricoles	<p>Impacts pour la défense militaire, l'aviation civile et les infrastructures terrestres technologiques.</p> <p><b>Obs. de Paris</b> – LESIA.</p> <p><b>OSUG</b> – IPAG.</p>
• Pollution atmosphérique (en particulier urbaine, lien avec la santé et le patrimoine)	<p><b>EFLUVE</b> – LISA, et <b>IPSL</b> – LISA, LSCE, CERE, groupe OCAP: Pollution atmosphérique.</p> <p><b>IPGP</b>: Nanoparticules anthropiques dans l'environnement.</p> <p><b>OPGC</b> – LMV: Gaz volcaniques.</p> <p><b>OSUG</b>: IGE</p> <p><b>OSUR</b> – ECOBIO: Émissions de composés organiques volatiles.</p> <p><b>THETA</b> – Biogéosciences (CRC): Exposition urbaine à plusieurs facteurs de stress environnementaux, y compris thermiques: îlot de chaleur urbain, qualité de l'air, dans un contexte de changement climatique.</p>
• Eutrophisation	<p><b>Ecce Terra</b> – METIS, FR-FIRE.</p> <p><b>OSUR</b> – Géosciences Rennes: Cycles des éléments et des contaminants.</p> <p><b>OTELo</b> – LIEC.</p>
• Incendies	<p><b>IPSL</b>: Modélisation des feux de forêt à échelle planétaire en lien avec le changement d'affectation des terres et le changement climatique.</p> <p><b>Pythéas</b> – RECOVER (Inrae).</p>
• Attribution des événements extrêmes aux facteurs humains	<p><b>IPSL</b>: Thème fédérateur.</p> <p><b>OSUG</b> – ETNA (Inrae): Aléas en montagne, IGE (Méditerranée, Afrique, Vietnam)</p>
• Sismicité induite et/ou déclenchée	<p><b>EOST</b></p> <p><b>OSUG</b> – ISTerre: Sismicité induite par l'exploitation des gisements d'hydrocarbures, les barrages et autres activités industrielles.</p> <p><b>OSUR</b> – Géosciences Rennes: Sismicité induite par l'exploitation minière.</p> <p><b>OTELo</b> – GeoRessources: Sismicité induite par les exploitations minières, géothermiques, en lien avec l'INERIS.</p>

## 3. RISQUES ENVIRONNEMENTAUX

<b>3.a Liés aux changements globaux</b> (changement climatique ; changement d'occupation et d'usage des sols).	<p><b>Ecce Terra, IPSL</b>: Impacts physiques (température, précipitations, crues, sécheresses, vents, ..., valeurs moyennes et extrêmes) ; impacts secondaires sur la production agricole, énergétique, la santé, ...</p> <p><b>OSUR</b> – Géosciences Rennes, LETG-Rennes, ECOBIO: Impacts du changement climatique sur les ressources (biodiversité, eau).</p>
• Signature sur le littoral (trait de côte, érosion, risque de submersion, pollutions, écotoxicologie, risques écosystémiques (biodiversité, peuplement, ...), ressources et stocks halieutiques, capacité aquacole, ressources minérales, ...)	<p><b>EOST</b> – IPGS: Sédimentologie.</p> <p><b>IUEM</b> – LGO, LETG-Brest, AMURE, LOPS: Étude de la variabilité pluri-décennale des états de mer, et impact sur le niveau marin à la côte pour ce dernier.</p> <p><b>OASU</b> – EPOC (équipe METHYS): Hydromorphodynamique littorale - trait de côte, dynamique des plages sableuses.</p> <p>LIENSs, EPOC, EABX (Inrae): Réponses fonctionnelles et adaptatives des populations et organismes, dynamique du trait de côte pour les deux premiers labos cités.</p> <p><b>OSUNA</b> – LETG-Nantes, MMS.</p> <p><b>OTELo</b> – LIEC: Aspects « multi-stress », tels que changement climatique et pollution des eaux continentales.</p> <p>Ecce Terra - M2C: Dynamique hydro-sédimentaire, morphodynamique côtière, risques écosystémiques, biodiversité</p>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risques et impacts pour les socio-écosystèmes marins côtiers</li> </ul>	<p><b>Ecce Terra</b> : Estuaires atlantiques (qualité des eaux estuariennes).  <b>IUEM</b> – LGO, LETG-Brest, AMURE : Vulnérabilité systémique des territoires côtiers à l'érosion, la submersion et la migration dunaire, incluant les aléas, les enjeux, les modalités de gestion et les représentations sociales de ces risques.  <b>OASU</b> – EPOC : Écologie marine côtière, dynamique des écosystèmes marins côtiers, espèces marines invasives, écophysiologie, écotoxicologie  LIENSs, ETBX (Inrae) : Enjeux socio-environnementaux en lien avec le littoral.  <b>OPGC</b> – LMV : Tsunamis d'origine volcanique.  <b>OSUNA</b> – LETG, MMS.  <b>OTELo</b> – LIEC, GeoRessources.  Ecce Terra - M2C. Écologie benthique, dynamique des écosystèmes marins et estuariens, effets cumulés.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Signature sur le milieu urbain (inondations, incendies, tremblements de terre, migrations)</li> </ul>	<p><b>Ecce Terra, IPSL</b> : Signatures de l'urbanisation sur les inondations.  <b>EOST</b> – LHYGES, IPGS.  <b>OPGC</b> – LMV : Retombées de cendres volcaniques, lahars et écoulements torrentiels (dont crues rapides) en milieu urbain (avec l'Institut Pascal).  <b>OSUG</b> – ISTerre, IFSTTAR : Risque sismique urbain.  <b>OTELo</b> – GeoRessources : Simulations de crises.  <b>Pythéas</b> – RECOVER (Inrae) : Vulnérabilité des interfaces habitat-forêt au risque d'incendie, et impact du changement climatique sur l'occurrence de grands feux.  <b>THETA</b> – Biogéosciences (CRC) : Végétalisation et ressources en eau pour la ville en période caniculaire.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Signature sur les ressources (minérales, énergétiques, eau)</li> </ul>	<p><b>IPSL</b> : Eau, vent, énergie.  <b>OSUG</b> – ETNA (Inrae), CEN (Météo France) : Impacts sur la cryosphère, IGE (ressource en eau, ressource énergétique d'origine climatique (vent, solaire, hydroélectricité)  <b>OSUNA</b>, en lien avec la FR IRSTV.  <b>OTELo</b> – GeoRessources, LIEC : Pour ce dernier, écotoxicologie, évaluation de l'impact environnemental des pressions anthropiques sur le continuum terre-eaux.  Ecce Terra - M2C : Extraction de granulats, valorisation des sédiments, écotoxicologie.  <b>Pythéas</b> – RECOVER (Inrae) : Impact des incendies sur les écosystèmes forestiers.  <b>THETA</b> – Biogéosciences (CRC) : Végétalisation et ressources en eau pour la ville en période caniculaire.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Signature sur les milieux de montagne (phénomènes gravitaires et hydro-géomorphologiques, phénomènes liés à l'évolution de la cryosphère)</li> </ul>	<p><b>OSUG</b> – IGE, ISTerre, EDYTEM.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crises socio-écologiques</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inégalités environnementales et sociales (injustice climatique)</li> </ul>	<p><b>IUEM</b> – LEMAR.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conflits</li> </ul>	
<p><b>3.b Autres risques</b></p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introduction d'espèces et invasions biologiques</li> </ul>	<p><b>OSUG</b> – LESSEM (Inrae).  <b>OTELo</b> – LIEC : Études des invasions animales et végétales dans les eaux douces.</p>



## INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS

Centre National de la Recherche Scientifique  
3, rue Michel-Ange 75016 Paris  
[www.insu.cnrs.fr](http://www.insu.cnrs.fr)

