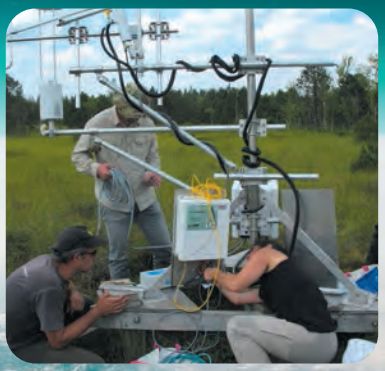
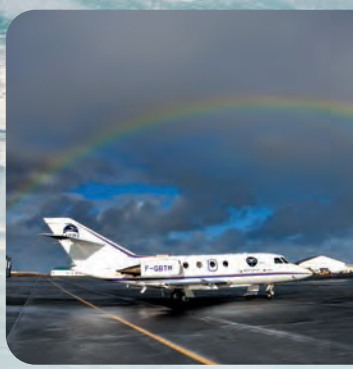
Livre Blanc sur les infrastructures françaises de recherche du domaine des sciences du système Terre et de l'environnement

Vision stratégique d'AllEnvi 2020-2030





AllEnvi

Alliance nationale de recherche pour l'Environnement

LIVRE BLANC SUR LES INFRASTRUCTURES FRANÇAISES DE RECHERCHE DU DOMAINE DES SCIENCES DU SYSTÈME TERRE ET DE L'ENVIRONNEMENT

Vision stratégique d'AllEnvi 2020-2030

REMERCIEMENTS

Nous remercions les participants (responsables d'infrastructures, de réseaux nationaux, animateurs des groupes thématiques et des grands enjeux transversaux d'AllEnvi) du séminaire « cohérence et futur des infrastructures dans le domaine des sciences du système Terre et de l'Environnement » organisé par la délégation générale d'AllEnvi le 14 novembre 2019 à l'ENS-Paris. Les conclusions de ce séminaire ont servi de base des recommandations mentionnées dans ce livre blanc.

Nous tenions à remercier les responsables des infrastructures mentionnées dans cet ouvrage qui nous ont transmis leurs photos pour illustrer les différents chapitres.

Merci également à la FRB pour la coordination artistique et l'appui éditorial.
Merci enfin à Thierry Caquet (INRAE) et Nicolas Arnaud (INSU-CNRS), membres du comité de pilotage scientifique d'AllEnvi, pour leur relecture attentive et la rédaction du résumé exécutif.

Citation :
S. Mahé, C. Marlin *et al.* (2020) Livre Blanc sur les infrastructures françaises de recherche du domaine des sciences du système Terre et de l'environnement - Vision stratégique d'AllEnvi 2020-2030. Paris, France : AllEnvi, 116 p.

Directeurs de la publication et auteurs :
Sylvain Mahé (INRAE) et Christelle Marlin (Université Paris-Saclay/CNRS)

Contributeurs :
Rédaction sous la direction des délégués généraux d'AllEnvi, Sylvain Mahé & Christelle Marlin,

Et les membres du groupe transversal Infrastructures, en particulier (par ordre alphabétique) :
Gilles Aumont (INRAE), Aurélien CarboniÈre (CNES), Jérôme Chappellaz (IPEV), Chantal Compère (IFREMER), Sylvie Galle (IRD), Maryvonne Gérin-Laslier (CNRS), Cathy Grevesse (CIRAD), Michel Guiraud (MNHN), Bruno Hamelin (CPU), Olivier Jamet (IGN), Dominique Joly (CNRS), Yvan Lagadeuc (ANDRA), Valérie Moulin (CEA), Marc Pignal (MNHN), François Robida (BRGM) et Hervé Roquet (Météo-France).

Coordination artistique :
Pauline Coulomb (FRB)
Graphisme et mise en page :
Natacha Bigan
Photos de couverture : SNO tourbière, RaRe, Le Pourquoi pas ? navire océanographique français de l'Ifremer - Antenne-Concordia-Thibaut VERGOZ-IPEV- FOF, Breuil, IRD, SAFIRE, fond : Daniel Olah

© AllEnvi - Octobre 2020
ISBN (imprimé) : 979-10-91015-50-9
ISBN (print) : 979-10-91015-51-6

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Les enjeux de la recherche en sciences de l'environnement

Depuis le début de l'ère industrielle, marquant l'entrée du système Terre dans l'Anthropocène, la Terre connaît l'une des plus grandes transformations environnementales qu'elle ait subies en un temps très court à l'échelle des temps géologiques. Les conséquences en sont visibles de l'échelle des territoires à celle du globe et affectent profondément l'ensemble des enveloppes fluides, les écosystèmes, les systèmes socio-économiques et la santé de l'environnement, dont celle de l'Homme.

Acquérir les données qui permettent de comprendre, modéliser et représenter, qualitativement et quantitativement, les changements et les processus sous-jacents permet d'agir sur le système Terre afin de limiter les changements en question ou réduire leurs impacts. Les infrastructures de recherche du domaine système Terre et environnement sont conçues pour soutenir et observer, sur le long terme, les différentes composantes environnementales parfois expérimenter ou encore en préserver des archives. Elles comportent aussi des outils numériques de calcul haute performance et de stockage massif des données offrant des services d'accessibilité suivant le principe FAIR. Beaucoup de ces données ainsi que leurs chaines de traitement et d'analyse sont également exploitables, et exploitées, par des acteurs qui ont une mission opérationnelle, notamment de protection des personnes et des biens. Les infrastructures de recherche en sciences du système Terre et de l'environnement sont donc une des pierres angulaires pour répondre aux grands enjeux scientifiques que posent les Objectifs du Développement Durable de l'ONU à l'horizon 2030 ou à ceux de la décennie des Nations Unies pour les sciences océaniques au service du développement durable (2021-2030).

Un panorama des infrastructures de recherche françaises du domaine des sciences du système Terre et de l'environnement

En France, le ministère chargé de la recherche a mis en place une démarche structurante qui a débouché en 2008 sur l'édition d'une première feuille de route nationale des infrastructures de recherche, mise à jour en 2012, 2016 puis 2018, parallèlement aux mises à jour successives de la feuille de route européenne ESFRI (*European Strategy Forum on Research Infrastructures*). Elle compte, en 2018, 25 infrastructures de recherche dans le domaine de l'environnement dont certaines communes avec les domaines Biologie-Santé ou Énergie.

Le découpage thématique en quatre grands domaines (atmosphère – océans – hydrosphère, écosystèmes continentaux et sols – géosphère) adopté par la feuille de route européenne ESFRI sert de cadre à ce document. L'analyse réalisée montre la cohérence du dispositif français des infrastructures de recherche au sein de chaque domaine. Certaines infrastructures sortent de ce cadre en ce qu'elles concernent plusieurs, voire toutes les composantes (infrastructures logistiques ; collections ; e-infrastructures, dont les pôles de données). Les briques de base de l'organisation sont, pour une large part, des réseaux nationaux d'observation et de mesure qui résultent d'un effort de construction de plusieurs décennies par les communautés, les organismes et les établissements. Un grand nombre de ces dispositifs nationaux constituent les miroirs français d'infrastructures européennes ou internationales. Ces réseaux ont également des déclinaisons locales ou régionales. Certains dispositifs s'étendent bien au-delà du seul territoire métropolitain, sur les territoires ultramarins nationaux mais également à l'étranger, grâce à des partenariats de longue date avec les pays concernés. Ce point fort et original permet d'enrichir la compréhension et la modélisation des mécanismes d'évolution de la Terre, du physique et du vivant. Le document présente et commente la répartition des infrastructures de recherche en fonction de 7 grands enjeux environnementaux : Biodiversité, Climat, Alimentation humaine et santé, Ressources naturelles, Territoires, Risques, Besoins technologiques et d'innovation.

Poursuivre la dynamique et envisager l'avenir

La nécessité de traiter les questions aux interfaces entre environnement, alimentation/nutrition, transition énergétique et santé dans son périmètre le plus large (*One Health/Eco-Health*) plaide pour la conduite d'une réflexion transdisciplinaire et inter-alliances. La transdisciplinarité et l'échange entre infrastructures doivent être renforcés au service d'une approche systémique des questions scientifiques, par exemple par le biais de services dans les pôles de données et la mise en commun de données variées par la consolidation des pôles de données en favorisant leur rapprochement pour l'étude des interfaces. La structuration de l'écosystème de la donnée est une priorité pour qu'elle irrigue toutes les recherches et assure la souveraineté de la France en ce domaine, en conduisant une réflexion nationale sur le modèle économique de la donnée de recherche dans le domaine sciences du système Terre et de l'environnement.

Une meilleure synergie scientifique entre infrastructures et avec les parties prenantes scientifiques et sociétales est nécessaire, avec des lieux et des moments de rencontres dédiés, une activité de réseau pour renforcer la coopération et la coordination entre acteurs pour l'expertise et l'appui aux politiques publiques. La veille technologique sur les développements instrumentaux doit conduire à renforcer les liens entre les infrastructures et l'industrie.

Bien dimensionner, planifier et garantir les moyens nationaux, financiers et humains, sur une base pluriannuelle est crucial pour que la France maintienne sa capacité logistique, ses collections et ses systèmes d'observation et d'expérimentation à haut niveau, et garde sa place dans la stratégie européenne et internationale dans le domaine des sciences du système Terre et de l'environnement.

AVANT-PROPOS

Ph. Mauguin, Vice-Président d'AllEnvi en charge des infrastructures, systèmes d'observation, services d'information environnementale et climatique

L'enjeu majeur pour la recherche en sciences de l'environnement et du système Terre, qu'elle soit fondamentale ou finalisée, est l'étude des changements, globaux ou plus locaux, de leurs déterminants ainsi que de leurs impacts. Apporter des solutions pour atteindre les 17 objectifs de développement durable définis par l'ONU à l'horizon 2030 est un engagement de notre pays qui nous donne la marche à suivre pour parvenir à un avenir plus durable pour tous. L'objectif est donc de contribuer à une compréhension et une modélisation de la « santé de la planète » (*Planetary health*) et de construire des solutions permettant l'adaptation de notre environnement et des sociétés aux changements globaux.

L'observation, l'expérimentation, la compréhension et la modélisation du système Terre et environnement nécessitent donc de disposer de dispositifs organisés en infrastructures de recherche pour acquérir, gérer, diffuser et traiter des données à différentes échelles spatiales et temporelles. Ces infrastructures de recherche ne peuvent se concevoir sans une vision d'ouverture et de partage, au niveau national et international, pour couvrir des milieux aussi divers que les océans, l'atmosphère, les surfaces continentales et la Terre profonde. C'est pourquoi, les infrastructures de recherche du domaine des sciences du système Terre et de l'environnement, inscrites sur la feuille de route nationale des infrastructures, constituent des instruments indispensables aux communautés de recherche et à leurs partenaires. Ces infrastructures proposent et contribuent également à des indicateurs de suivi de l'état du système Terre, pertinents et validés pour la définition et l'appui aux politiques publiques.

Convaincu que nos dispositifs sont des atouts, mais qu'ils méritent également une vision globale et coordonnée pour la recherche française, j'ai demandé en 2018 au groupe transversal « Infrastructures » de l'alliance AllEnvi de conduire une réflexion inter-organisme sur une vision stratégique, à 2030, sur les infrastructures françaises de recherche du domaine des sciences du système Terre et de l'environnement. Cette année, la pandémie de COVID-19 est venue cruellement nous rappeler que santé humaine, santé animale et

des plantes, et santé des écosystèmes sont étroitement liées dans une écologie de la santé. Insuffisamment soutenues jusqu'à maintenant, tant dans les priorités de recherche nationales que dans les politiques publiques, l'approche dite « une seule santé » (*One Health*) et la « science du développement durable » (*sustainability science*) constituent à l'évidence, des nouvelles orientations de la recherche qu'il convient de poursuivre. Mieux anticiper les prochaines crises implique de consolider les bases d'une écologie de la santé s'intéressant aux interdépendances entre le fonctionnement du système Terre et environnement dans toutes ses composantes, les pratiques socio-culturelles, la santé des populations humaines et des écosystèmes prises ensemble, afin d'en tirer les conséquences pratiques et politiques des connaissances.

La complexité et le nombre des compartiments étudiés, des disciplines impliquées et des questions qui se posent à différentes échelles de temps et d'espace a conduit les communautés de recherche à se doter d'un nombre important d'infrastructures de recherche et d'e-infrastructures dans le domaine de l'environnement. Celles-ci sont souvent caractérisées par des approches pluridisciplinaires, mobilisant de nombreuses technologies. Elles répondent de plus en plus aux exigences de la science ouverte et du partage des données. Toutefois, il convenait d'en donner un paysage fonctionnel.
Un panorama des infrastructures de recherche nationales est présenté dans ce livre blanc, par type de dispositif et par grand compartiment du système Terre (partie I). Ce panorama est enrichi par une analyse en grands enjeux environnementaux (biodiversité, climat, alimentation humaine et santé, ressources naturelles, territoires, risques, besoins technologiques et d'innovations), des points forts et faiblesses (partie II) pour finir par 21 recommandations (partie III). Ces recommandations serviront de base de discussions pour les différents organismes membres d'AllEnvi pour les mises à jour de la feuille de route nationale des infrastructures à l'échéance de 2030.

Fruit d'un travail collectif long et approfondi, ce livre blanc souligne la qualité et la cohérence de notre dispositif d'IR et e-IR, sa place reconnue au niveau européen, et dessine les orientations nécessaires pour le soutenir et lui donner toutes les capacités pour répondre aux enjeux de ce domaine. Cela permet une meilleure lisibilité de ces nombreuses infrastructures au service des communautés scientifiques mais également des politiques et des décideurs, voir des citoyens.

Je remercie les deux délégués généraux de l'alliance AllEnvi pour la coordination de cet ouvrage et les membres du groupe transversal « Infrastructures » pour leur engagement dans la réalisation de ce document.

SOMMAIRE

13 INTRODUCTION

19 **PARTIE I. Les infrastructures de recherche du domaine des sciences du système Terre et de l'environnement en France et en Europe**
21 I.1. Historique et évolution de la structuration jusqu'à nos jours
27 I.2 Les grands équipements transversaux de logistique et analytiques
31 I.3 Collections d'échantillons biologiques et géologiques et documents historiques
36 I.4 Domaine : Atmosphère
41 I.5 Domaine : Océans
46 I.6 Domaine : Hydrosphère, écosystèmes continentaux et sols
51 I.7 Domaine : Géosphère
54 I.8 Pôles de données
57 I.9 Schéma d'organisation des infrastructures dans le contexte national et européen

59 **PARTIE II. Positionnement des infrastructures pour répondre aux grands enjeux scientifiques et sociétaux**
62 II.1 Biodiversité
66 II.2 Climat
71 II.3 Alimentation humaine et santé
75 II.4 Ressources naturelles
79 II.5 Territoires
82 II.6 Risques
86 II.7 Besoins technologiques et d'innovations

91 **PARTIE III. Analyse, recommandations et évolution stratégique du dispositif national**
93 III.1 Recommandations transversales
96 III.2 Domaines appelant le développement de nouvelles infrastructures ou structurations nationales
99 III.3 Besoins de développements technologiques et méthodologiques
101 III.4 Synergies entre infrastructures et dispositifs nationaux d'observation/expérimentation
103 III.5 Formation et nouvelles compétences
105 III.6 Données et services : interfaces avec le monde socio-économique, modélisation
108 III. 7 Moyens humains et financiers pour le fonctionnement, jouvence et nouveaux équipements des infrastructures de recherche

112 **GLOSSAIRE – Liste des abréviations et acronymes**

Introduction

Depuis le milieu du XXème siècle, les recherches en sciences de l'environnement[1] sont au cœur de multiples enjeux de la société. L'homme a besoin de comprendre son environnement pour s'y positionner au mieux, l'exploiter pour ses besoins en ressources alimentaires, en eau, en énergie, en matières premières, mais aussi pour s'en protéger si nécessaire, notamment vis-à-vis des risques naturels, sanitaires, climatiques et/ou telluriques. Ainsi, la recherche en sciences de l'environnement est essentielle pour comprendre, modéliser et élaborer des solutions permettant l'adaptation des sociétés aux changements globaux que subit la Terre.

Depuis l'ère industrielle, marquant l'entrée du système Terre dans l'Anthropocène[2], la Terre connaît l'une des plus grandes transformations environnementales qu'elle ait subie en un temps très court à l'échelle des temps géologiques. Les conséquences en sont visibles de l'échelle des territoires à celle du globe et pour tous les compartiments – atmosphère, océan et terres émergées. Nombre des modifications qui affectent les écosystèmes ont des conséquences écologiques et impactent profondément les systèmes socio-économiques et la santé de nos environnements, voire celle de l'homme. En 1972, le premier sommet de la Terre (Stockholm, Suède) marque la prise de conscience par plusieurs États de la vulnérabilité de la planète et le début d'un dialogue sur une gestion écologiquement rationnelle de l'environnement entre les pays industrialisés et les pays en développement. Aujourd'hui, l'ambition des Nations-Unies de transformer

1. Sciences de l'environnement : ensemble des disciplines et technologies qui contribuent aux sciences physiques, biologiques et aux sciences humaines et sociales afin d'étudier l'environnement, défini comme l'ensemble des éléments biotiques ou abiotiques qui entourent un individu ou une espèce dans des conditions naturelles ou sociologiques.

2. Anthropocène : ère correspondant à la période où les activités humaines ont commencé à avoir un impact sur les écosystèmes terrestres (Zalasiewicz J., Williams M., Haywood A. & Ellis M. *The Anthropocene : a new epoch of geological time?* Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 369, 835–841 (2011), https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0339 ; Lewis S., Maslin M. Defining the Anthropocene. Nature, 519, 171–180 (2015), https://doi.org/10.1038/nature14258).

notre monde à l'horizon 2030 engage tous les pays et toutes les parties prenantes à agir de concert pour atteindre 17 objectifs du développement durable[3] (ODD). La recherche, la technologie et l'innovation sont mobilisées pour atteindre ces ODD, qui peuvent également bénéficier de l'approche émergente de la « science du développement durable » (*sustainability science*).
L'enjeu majeur du XXIème siècle pour la recherche en sciences de l'environnement, qu'elle soit fondamentale ou finalisée, est l'étude sur le long terme des changements, globaux ou plus locaux, de leurs déterminants ainsi que de leurs impacts, tant en termes d'environnement physique que biologique à toutes les échelles. Il s'agit, pour cela, d'acquérir les données essentielles afin de comprendre et représenter, qualitativement et quantitativement, divers processus qui concernent ce que l'on appelle le système Terre, pour éventuellement agir sur le système afin de limiter les changements en question ou leurs impacts. Ce système englobe chacun des processus physiques, chimiques ou biologiques qui se déroulent sur la planète, y compris les interactions entre les humains et leur environnement et entre les différents compartiments de la Terre[4]. Parmi ces derniers, « l'épiderme » de la Terre, allant de la basse atmosphère au proche sous-sol, est considéré comme une zone critique pour la vie.

La compréhension et la modélisation du système Terre nécessitent donc, par essence, de disposer de dispositifs d'observation et/ou d'expérimentation ainsi que d'infrastructures numériques, pour acquérir des données à différentes échelles spatiales (du nanomètre au global) ou temporelles (de l'instantané à l'histoire de la planète), ainsi qu'à différents niveaux d'intégration des systèmes (de la chimie moléculaire à l'évolution de communautés interspécifiques). En raison des cinétiques d'évolution, parfois lentes, des processus en jeu dans l'environnement, et de la complexité des systèmes et de leurs interactions, les infrastructures de recherche du domaine système Terre et de l'environnement doivent être conçues de manière à pouvoir être utilisées sur le long terme.

L'observation et l'expérimentation, y compris l'expérimentation numérique, s'appuient sur un choix raisonné de milieux d'étude et d'observables d'abord dictés par la recherche : le choix des sites d'observation et des modèles d'expérimentation est un point majeur. L'utilisation et le développement d'outils de haute technicité permettent

3. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/ODD

4. En 2005, un groupe international d'experts scientifiques pour observer la Terre et mesurer les conséquences des activités humaines est créé (Group on Earth Observations – GEO).

d'aborder des questions scientifiques relevant d'une multitude de disciplines. Elles nécessitent également des moyens d'accès mutualisés aux milieux étudiés, d'envergure nationale ou internationale (navires, avions, bases et plateformes, ballons, satellites, réseaux de mesure *in situ*, etc.) pour couvrir divers milieux tels que les océans, l'atmosphère, les surfaces continentales ou la Terre solide, ainsi que l'accès à des moyens de calcul haute performance et des moyens de stockage massif des données. Pour répondre aux objectifs de qualité des données et de performances des dispositifs de mesure dans des conditions parfois extrêmes, les systèmes doivent mettre en œuvre les technologies les plus avancées : ils sont donc souvent sources d'innovation dans différents domaines (mesures, traitement du signal, gestion et analyse des données…).

Pour assurer à la communauté scientifique la pérennité d'un accès à des échantillons collectés *in situ* (organismes, roches et minéraux, glaces…) ou issus d'expérimentations de laboratoire, nécessaires pour l'étude de chroniques longues, des collections reconnues sont indispensables.

Pour répondre, à terme, aux défis de la modélisation du système Terre, il est nécessaire de rendre accessible de façon ouverte et pour l'ensemble de la communauté des chercheurs les grandes quantités de données produites, issues d'observations et de simulations de référence. Cela suppose des entités structurées (par exemple, des e-infrastructures) offrant des services d'accessibilité suivant le principe FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable), mais aussi des moyens de stockage, de calcul et de modélisation numérique de grande capacité. Si le partage de connaissances et l'interopérabilité[5] sont bien souvent axés sur le partage des données, l'harmonisation et la standardisation de méthodes de collecte de données et de leur description fiable sont des éléments qui sont de plus en plus importants, en particulier dans le cadre d'actions communes aux infrastructures européennes, voire dans un cadre international. Au final, ces évolutions en matière de données imposent des organisations dédiées mises en œuvre et développées par les infrastructures de recherche et e-infrastructures spécialisées dans les méthodes et outils de production, la curation et le traitement des données, au service des communautés. Leur fonctionnement doit garantir un haut niveau de qualité et de fiabilité, notamment en termes de durée et

5. La Commission Européenne définit l'interopérabilité comme « l'aptitude d'organisations disparates et diverses à interagir en vue de la réalisation d'objectifs communs mutuellement avantageux, arrêtés d'un commun accord, impliquant le partage d'informations et de connaissances entre ces organisations à travers les processus métiers qu'elles prennent en charge, grâce à l'échange de données entre leurs systèmes informatiques respectifs » (Article 2 de la décision n°922/2009/CE).

d'interopérabilité. Si les exigences de la recherche sont primordiales, beaucoup de ces données ainsi que leurs chaines de traitement et d'analyse sont également exploitables, et exploitées par des acteurs qui ont une mission opérationnelle, notamment de protection des personnes et des biens (par exemple, les services Copernicus).

Par ailleurs, certains environnements comme les milieux polaires exigent une coordination internationale pour utiliser de manière efficace dans le cadre d'accords internationaux les moyens logistiques coûteux dans lesquels les nations ont investi. Des infrastructures nationales sont implantées en milieux polaires, en partenariat avec d'autres pays européens (Antarctique, îles subantarctiques, Svalbard). En Antarctique, parmi la trentaine de nations gérant les stations de recherche et les moyens logistiques d'accès, seules la France et l'Italie opèrent conjointement une station de recherche (base franco-italienne Concordia). En Arctique, la mise en commun de moyens passe notamment par le partage de temps de navires océanographiques brise-glaces.

Dans ce document sont considérés :

· Les entités ayant été reconnues comme infrastructures de recherche au niveau national (inscrites sur la feuille de route nationale[6]) ou européen (ESFRI[7]).

· Des outils ou dispositifs nationaux d'observation ou d'expérimentation d'organismes ou d'établissements membres d'AllEnvi.

Le positionnement à l'international de certaines infrastructures du domaine de l'environnement est aussi mentionné. Deux projets européens Horizon2020[8] ont visé à dresser un panorama européen et international des réseaux et infrastructures, avec un travail dédié au domaine de l'environnement pour le projet RISCAPE[9], et une tâche spécifique pour le projet ENVRIplus[10]. On peut également explorer l'ensemble du paysage européen des infrastructures à travers le projet MERIL[11].
L'organisation française, telle que définie sur la feuille de route nationale 2018, répond globalement au paysage européen. Ainsi, l'implication française dans les infrastructures européennes s'appuie sur des réseaux nationaux bien structurés et coordonnés avec quelques spécificités qui peuvent constituer de véritables atouts dans la construction européenne des infrastructures de recherche, notamment du fait de la couverture géographique des sites instrumentés et les méthodes et technologies de mesure et d'observation. Les différentes thématiques couvertes par les infrastructures portent toutes sur des échelles nationales, même si la plupart ont également des déclinaisons locales ou régionales d'intérêt. Ainsi, certains dispositifs des infrastructures françaises s'étendent bien au-delà du seul territoire métropolitain et bénéficient d'une couverture mondiale de points d'études et de mesures à la fois sur les territoires ultramarins nationaux (océans Atlantique, Pacifique et Indien) mais également en Amérique du Sud, en Amérique centrale, en Afrique du Nord, sub-saharienne et australe, en Asie, avec des partenariats de longue date avec les pays concernés. Ces partenariats permettent notamment à la communauté française de conduire des observations en zone intertropicale (*hot spots*), particulièrement touchée par les changements climatique et écologique et où les populations humaines sont vulnérables. Ces régions sont généralement peu couvertes par des observatoires de recherche sur le long terme. Cette particularité est un point fort et original de la communauté française et permet d'enrichir la compréhension et la modélisation des mécanismes d'évolution de la Terre et du vivant.

L'investissement logistique et humain très important requis par ce déploiement global constitue l'une des caractéristiques et l'une des forces du dispositif français des infrastructures au sein des coordinations européennes et internationales.

6. http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid70554/la-feuille-de-route-nationale-des-infrastructures-de-recherche.html.
7. ESFRI: European Strategy Forum on Research Infrastructures (www.esfri.eu).Le forum ESFRI européen s'est mis en place en 2002 et a produit une première feuille de route européenne en 2006.
8. Cf. les projets COOPEUS (2012-2015) et COOP+ (2016-2019) sur l'interopérabilité des infrastructures de recherche européennes et américaines (NSF).
9. RISCAPE : European Research Infrastructures in the International Landscape.
10. http://www.envriplus.eu/2019/10/28/final-envriplus-report/.
11. MERIL : Mapping of the European Research Infrastructure Landscape (https://portal.meril.eu/meril/).

1. Les infrastructures de recherche du domaine des sciences du système Terre et de l'environnement en France et en Europe

Ce chapitre dresse un portrait des infrastructures de recherche françaises du domaine des sciences du système Terre et de l'environnement, dont les briques de base sont des réseaux nationaux parfois anciens, principalement organisés et gérés par les organismes de recherche. Associée à ces organismes, la recherche universitaire permet de décupler les moyens, le potentiel humain mobilisable, les impacts et la diffusion des résultats, y compris à travers la formation.

Un grand nombre de ces dispositifs nationaux constituent les miroirs français d'infrastructures européennes (notamment celles de la feuille de route ESFRI) ou internationales.
Le découpage thématique adopté par la feuille de route européenne ESFRI sert de cadre à cette partie du document. Il reprend les grands compartiments du système Terre :

- Atmosphère (§ I.4).
- Océans (§ I.5).
- Hydrosphère, écosystèmes continentaux et sols (§ I.6).
- Géosphère (§ I.7).

Certaines infrastructures sortent de ce cadre en ce qu'elles concernent plusieurs, voire toutes les composantes :

- Des infrastructures logistiques, supports de plusieurs thématiques de recherche (§ I.2).
- Les collections d'échantillons biologiques, pédologiques et géologiques et les documents historiques (§ I.3).
- Les e-infrastructures, dont les pôles de données (§ I.8).

Des infrastructures de recherche relevant plutôt des sciences biologiques, des sciences médicales, des sciences de la matière ou des sciences de l'ingénieur ou spécialisées dans les sciences humaines ne seront pas abordées dans ce document, même s'il est souvent nécessaire de revendiquer tous les domaines scientifiques et technologiques pour comprendre le système Terre. Certaines infrastructures se situent à l'interface entre les domaines sciences du système Terre et de l'environnement et Biologie-Santé comme :

- Emphasis-FRANCE et Phénome pour le phénotypage des plantes, qui permet d'étudier les interactions entre les contraintes biotiques/abiotiques et la génétique des plantes.
- EMBRC-FRANCE, centre national de ressources biologiques marines, qui permet d'évaluer leurs applications potentielles dans les domaines de l'agriculture, de la santé, de la cosmétique, etc.

Citons également In-Sylva (dédiée aux recherches en sylviculture, à travers une vision intégrée de la forêt, dans le but d'élaborer une gestion adaptative et durable des peuplements forestiers) et RARe (ensemble des Centres de Ressources Biologiques utilisés en recherche) qui sont des IR dédiées à l'étude de la génétique de certaines espèces, à la conservation d'échantillons pour des recherches en biologie et microbiologie ou de ressources pour la sélection, jusqu'à la biotechnologie industrielle…

Les infrastructures de recherche décrites dans ce document dépassent les disciplines et les spécialisations des organismes de recherche et des universités pour apporter des services, des données et des développements technologiques indispensables aux communautés scientifiques qui s'intéressent aux sciences de l'environnement.

L'infrastructure IBISBA-FRANCE sur les biotechnologies blanches industrielles et la biologie synthétique se situe, sur la feuille de route nationale, à l'interface de 3 domaines (Sciences du Système Terre et de l'environnement, Biologie-Santé et Énergie).

De même, dans le domaine des sciences humaines et sociales, on peut citer E-RI-HS qui est une infrastructure d'analyse et d'imagerie pour étudier les matériaux du patrimoine, en lien avec RECOLNAT où figurent les collections naturalistes des muséums et des universités.

1/ HISTORIQUE ET ÉVOLUTION DE LA STRUCTURATION JUSQU'À NOS JOURS

L'observation de l'environnement est très ancienne. Les herbiers historiques du Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) datent du XVIIème siècle. Les séries marégraphiques françaises les plus longues datent de la même époque et ont commencé par l'installation de jauges de niveau de la mer dans les ports. De même, les séries de données sur la déclinaison magnétique ont débuté avec la création de l'Observatoire de Paris en 1667. A la fin du XIXème siècle, le premier observatoire magnétique était installé à Saint-Maur-des-Fossés et au début du XXème siècle, un premier observatoire national géophysique, composé de sismographes et d'un gravimètre, était mis en place en Martinique.

Dans le domaine agronomique, la ville de Verrières-le-Buisson conserve, dans l'herbier Vilmorin-Andrieux, une collection de pommes de terre accompagnée des résultats d'enquêtes agronomiques effectuées entre 1780 et 1800 auprès d'agriculteurs qui testaient les premières variétés. Ces observations sont aujourd'hui intégrées dans une infrastructure nationale (RECOLNAT) et européenne (DiSSCo). En Europe, les expérimentations à long terme accompagnées de collections d'échantillons les plus anciennes connues sont celles menées par le centre de recherche de Rothamsted en Angleterre, fondé en 1843. En France, des essais agronomiques menés à Nantes sont rapportés en 1852. Sur l'actuel site INRAE de Versailles, des tests sur des sols limoneux représentatifs des grands espaces céréaliers du nord de la France ont débuté en 1928[12]. Dès 1949, l'INRA a créé des unités expérimentales dédiées à l'expérimentation agronomique, dont certaines sont toujours le support d'Observatoires de Recherche en Environnement (ORE)[13] ou de Centres de Ressources Biologiques (CRB), intégrés aujourd'hui dans des infrastructures de recherches nationales (RARe, AnaEE-FRANCE NATURA, eLTER-FRANCE OZCAR) et européennes (AnaEE, eLTER).

Dans ce domaine de l'observation en sciences de la Terre et de l'univers, dès les années 1970, le CNRS a commencé à structurer, au travers de l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU), l'observation scientifique. En 1990, avec la création de services d'observations (SO) appelés aujourd'hui Services Nationaux d'Observation (SNO), le CNRS s'assure de la qualité et de la continuité des observations. Ces SNO ont pris la suite, en les structurant, de dispositifs d'observation plus anciens (par exemple le Bureau Central Sismologique Français ou le Bureau Central de Magnétisme Terrestre créés en 1921 pour documenter respectivement la sismicité et le magnétisme de la France). Dans le domaine de l'hydrologie, après la Décennie Hydrolo-

12. Burgevin H., Hénin S. Dix années d'expériences sur l'action des engrais sur la composition et les propriétés d'un sol de limon. Annales Agronomiques, 9, 771–799 (1939).

13. ORE : Observatoire de Recherche en Environnement. Dispositifs créés en 2001, labélisés et financés à partir de 2003 par le ministère chargé de la recherche sur différents thèmes : hydrologie, écosystèmes et biodiversité, atmosphère et climat, dynamique côtière et océans, Terre solide, etc.

gique Internationale de l'Unesco (1965-1974), un premier « inventaire des bassins versants représentatifs et expérimentaux français »[14] a été établi. Les travaux sur ces bassins versants, dénommés BVRE, se sont intensifiés dans les années 80-90. Plusieurs de ces bassins versants sont intégrés aujourd'hui dans les infrastructures eLTER-France OZCAR et RZA.

Dans les années 2000, la création des ORE a permis d'élargir cette structuration à l'ensemble dessystèmes environnementaux. Dans les années 2010, l'Alliance nationale de recherche pour l'Environnement (AllEnvi) a développé les Systèmes d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement (SOERE), avec l'objectif de poser les fondements de nouvelles infrastructures de recherche nationales impliquant une mutualisation des organismes et des universités, dans une démarche d'observation/expérimentation/modélisation, impulsant une logique intégrative d'observations de variables liées ou complémentaires.

En France, le ministère chargé de la recherche a mis en place une démarche structurante qui a débouché en 2008 sur l'édition d'une première feuille de route nationale des infrastructures de recherche. Cette feuille de route a été mise à jour en 2012, 2016 puis 2018, parallèlement aux mises à jour successives de la feuille de route européenne ESFRI.

Dans le domaine des sciences du système Terre et de l'environnement, les infrastructures françaises labélisées résultent, le plus souvent, d'un effort de construction de plusieurs décennies par les communautés, les organismes et les établissements d'enseignements supérieurs.

14. Cosandey C., Vuillaume G., 1979. Inventaire des bassins versants représentatifs et expérimentaux en France. Ministère de l'environnement et du cadre de vie, CNRS, ORSTOM, 96 p. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers14-12/010012563.pdf

Dans le domaine des sciences du système Terre et de l'environnement, la feuille de route nationale 2018 recense 25 infrastructures de recherche dont deux communes avec le domaine Biologie-Santé, une commune avec les domaines Biologie-Santé et Énergie et une en projet. Ces infrastructures sont listées dans le Tableau 1 et réparties par grandes composantes du système Terre et environnement ou par grands types dans le Tableau 2.

Pour l'année 2016, le coût complet de l'ensemble des infrastructures nationales labélisées (OI, TGIR et IR[15]) a été évalué à 1 338 M€pour 95 infrastructures. Le domaine des *sciences du système Terre et de l'environnement*, avec ses 23 infrastructures labélisées[16] (24 % des infrastructures labélisées), représentait 319 M€, soit 23,8 % du coût total. Ce premier exercice réalisé en 2017 à partir des données de 2016, a permis de mettre en évidence l'importance des infrastructures de recherche dans le domaine des sciences du système Terre et de l'environnement, notamment en raison de la mobilisation des différents organismes impliqués et des nombreux personnels qui contribuent aux infrastructures distribuées (de l'ordre de 1500 ETPT).

TABLEAU 1 LISTE DES INFRASTRUCTURES FRANÇAISES DU DOMAINE « SCIENCES DU SYSTÈME TERRE ET DE L'ENVIRONNEMENT », INSCRITES SUR LA FEUILLE DE ROUTE NATIONALE 2018

(http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid70554/la-feuille-de-route-nationale-des-infrastructures-de-recherche.html ; OI = Organisation Internationale, TGIR = Très Grande Infrastructure de Recherche et IR = Infrastructure de Recherche).

Tableau 1A

CATÉGORIE	NOM	NOM COMPLET	ESFRI
OI	CEPMMT	Météorologiques à Moyen Terme	
TGIR	Concordia	Station antarctique franco-italienne	
TGIR	ECORD/IODP	Programme international de forage profond en mer/European Consortium for Ocean Drilling Research/International Ocean Discovery Program	
TGIR	EURO-ARGO	Réseau *in-situ* global d'observation des océans/ European contribution to Argo program	EU-RO-AR-
TGIR	FOF	Flotte Océanographique Française	
TGIR	ICOS-FRANCE	Système Intégré d'Observation du Carbone/Integrated Carbon Observation System	ICOS (2006)

15. OI = Organisation Internationale ; TGIR = Très Grande Infrastructure de Recherche ; IR = Infrastructure de Recherche.

16. En 2016, In-Sylva et eLTER-France RZA n'étaient pas inscrites sur la feuille de route nationale des infrastructures de recherche.

Tableau 1B

CATÉGORIE	NOM	NOM COMPLET	ESFRI
IR	ACTRIS-FRANCE	Aerosol, Cloud and Trace Gases Research Infrastructure	ACTRIS (2016)
IR	AnaEE-FRANCE ÉCOTRONS	Analyses et Expérimentations sur les écosystèmes –Ecotrons	AnaEE (2010)
IR	AnaEE-FRANCE NATURA	Analyses et Expérimentations sur les écosystèmes – in natura	AnaEE (2010)
IR	CLIMERI-FRANCE	Infrastructure nationale de modélisation du système climatique de la Terre/Earth's Climate system Modelling	
IR	eLTER-FRANCE OZCAR	Observatoire de la Zone Critique, Applications, Recherche	eLTER (2018)
IR	eLTER-FRANCE RZA	Réseau des Zones Ateliers – Infrastructure des socio-écosystèmes	eLTER (2018)
IR	EMBRC-FRANCE (Biologie-Santé)	Centre National de Ressources Biologiques Marines/European Marine Biological Resources Center	EMBRC (2008)
IR	EMPHASIS-FRANCE (Biologie-Santé)	European Infrastructure for multi-scale Plant Phenomics and Simulation for food security in a changing climate (France)	EM-PHASIS (2016)
IR	EMSO-FRANCE	European Multidisciplinary Seafloor and water column Observatory – France	EMSO (2006)
IR	IAGOS-FRANCE	Instruments de mesure embarqués sur avions pour l'observation globale/In-service Aircraft for Global Observing System	IAGOS (2006)
IR	IBISBA-FRANCE (Biologie-Santé et Énergie)	Industrial Biotechnology Innovation and Synthetic Biology Acceleration	IBISBA.eu (2018)
IR	ILICO	Infrastructure LIttorale et CÔtière	
IR	In-Sylva	Infrastructure Nationale de recherche pour la gestion adaptative des forêts	
IR	PNDB	Pôle National de Données de Biodiversité	
IR	RARe	Ressources Agronomiques pour la Recherche	
IR	RECOLNAT	Réseau des Collections Naturalistes françaises	DISSCo (2018)
IR	RESIF/EPOS	Réseau sismologique et géodésique français/ European Plate Observing System	EPOS (2008)
IR	SAFIRE	Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement	
Projet	DATA TERRA	Pôles de données et services pour le système Terre	

TABLEAU 2 LISTE DES INFRASTRUCTURES FRANÇAISES DU DOMAINE « SCIENCES DU SYSTÈME TERRE ET DE L'ENVIRONNEMENT », INSCRITE SUR LA FEUILLE DE ROUTE NATIONALE 2018.
· EN FONCTION DU TYPE D'INFRASTRUCTURES OU DU DOMAINE CONCERNÉ
(·) LORSQUE LE DOMAINE EST SECONDAIRE OU MARGINAL DANS L'IR.

		DOMAINE					
NOM	EQUIPEMENTS TRANSVERSAUX (logistique, analytique)	Atmosphère	Océans	Hydrosphère, écosystèmes continentaux et sols	Géosphère	E-infrastructures pôles de données	Collections
CEPMMT		●	●	●		●	
Concordia	●	●	●	●	●		
ECORD/IODP	●		●		●		
EURO-ARGO			●				
FOF	●	●	●	(●)	●		
ICOS-FRANCE		●	●	●			
ACTRIS-FRANCE		●					
AnaEE-FRANCE ÉCOTRONS				●			
AnaEE-FRANCE NATURA				●			
CLIMERI-FRANCE		●	●	●		●	
eLTER-FRANCE OZCAR				●	●		
eLTER-FRANCE RZA				●			
EMBRC-FRANCE			●				
EMPHASIS-FRANCE				(●)			
EMSO-FRANCE			●		●		
IAGOS-FRANCE		●					
IBISBA-Fr				(●)			
ILICO			●	●	(●)		
In-Sylva				●			
PNDB			●	●		●	
RARe				●			●
RECOLNAT				●	●	(●)	●
RESIF/EPOS					●		
SAFIRE	●	●	(●)	(●)	●		
DATA TERRA		●	●	●	●	●	

Dans le paysage européen, ENVRI fédère la communauté des Infrastructures de recherche environnementales, les projets, les réseaux et les acteurs à l'échelle européenne[17]. Le projet H2020 ENVRIplus, porté par l'ERIC[18] ICOS (Figure 1), a regroupé tous les domaines de la science des systèmes terrestres – domaine atmosphérique, domaine marin, biosphère et domaine Terre solide – et rassemble la plupart des infrastructures de ces domaines, en vue d'en améliorer la cohérence, l'interdisciplinarité et l'interopérabilité.

Le projet H2020 ENVRI-FAIR[19] poursuit les travaux d'ENVRIplus pour intégrer la communauté ENVRI dans le dispositif européen EOSC à travers le développement de services de données FAIR.

FIGURE 1 ORGANISATION D'ENVRIPLUS.

17. ENVRI community is a community of Environmental Research Infrastructures - https://envri.eu/

18. ERIC : European Research Infrastructure Consortium.

19. https://envri.eu/home-envri-fair/

2/ LES GRANDS ÉQUIPEMENTS TRANSVERSAUX ANALYTIQUES ET DE LOGISTIQUE

L'observation du système *Terre et de l'environnement* nécessite des moyens mutualisés entre communautés scientifiques et gérés entre organismes. Lorsque les infrastructures s'appuient sur des moyens de géolocalisation, elles utilisent implicitement les infrastructures de localisation mises en place à l'échelle internationale par des organismes nationaux [réseaux de Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites permanent (GNSS)] ainsi que des produits scientifiques internationaux auxquels la France contribue très largement [Repère international de référence terrestre (ITRF), notamment]. L'observation demande par ailleurs de grands équipements de logistique et d'analyse.

• **La flotte océanographique française (TGIR FOF[20])** appuie l'exploration des océans, et sert aussi bien l'étude de l'océan lui-même que celle des processus atmosphériques (échanges océan-atmosphère), des processus de la Terre interne (tectonique, volcanisme…) ou celle des processus biologiques (écosystèmes marins, ressources halieutiques…). Elle répond également à des besoins de surveillance, d'expertise ou de missions de service public pour le compte de l'État. Elle est par ailleurs régulièrement sollicitée dans le cadre de partenariats recherche-industrie avec le monde socio-économique.

La FOF, opérée par Ifremer avec l'aide de l'armateur Génavir, fédère l'ensemble des navires océanographiques hauturiers et côtiers nationaux,

20. https://www.flotteoceanographique.fr/

soit 18 navires (4 navires hauturiers, 2 navires semi-hauturiers, 5 navires côtiers opérant en métropole et en outre-mer et 7 navires de stations), 4 engins sous-marins et un parc instrumental. La FOF permet de mener à bien des recherches en sciences de l'univers et de l'environnement dans de nombreux domaines : géosciences, océanographie physique et biologique, biogéochimie des océans, paléoclimatologie, écologie et biodiversité. Une structuration commune des flottes européennes n'est pas à l'ordre du jour, mais les projets européens I3[21] Eurofleet 1 et 2 (2009-2017) et EurofleetsPlus (2019-2023), portés par l'Ifremer, ont permis la mise en place d'accès transnationaux.

Par ailleurs, ARICE est un projet européen mettant en commun du temps océanographique de six brise-glaces appartenant à des nations européennes ainsi qu'au Canada et aux États-Unis. Il permet ainsi à des chercheurs issus de pays ne possédant pas de navire océanographique brise-glace, comme la France, d'accéder à ces moyens via un ticket modérateur.

© SAFIRE

21. I3 : Initiative Intégrée d'Infrastructure (programme cadre européen).

• **Le Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement (IR SAFIRE[22])** compte 3 avions dotés de capacités spécifiques d'embarquement d'instrumentations scientifiques. Ils appuient les recherches sur la physique et la chimie de l'atmosphère, les opérations de télédétection aéroportée pour le suivi des surfaces continentales et océaniques, et des expérimentations technologiques dans le domaine de l'aérospatial. SAFIRE est opéré en commun par Météo-France, le CNRS et le CNES. Il met également son expertise au service des communautés pour équiper et instrumenter leurs avions en fonction des besoins des recherches, dans le monde entier. Il contribue au consortium européen EUFAR[23]. SAFIRE poursuit également l'objectif stratégique de développer une offre « drones pour la recherche », et de développer une plus grande synergie et une plus grande intégration avions/ballons/drones, et différentes formes d'hybridation, avec tous les partenaires concernés (y compris privés). Cela pourrait constituer un cadre idéal au niveau français pour faire émerger des innovations scientifiques, techniques et applicatives.

• **La station scientifique franco-italienne Concordia (TGIR)[24],** située sur le plateau antarctique (3 200 m d'altitude), offre un accès indispensable à ce milieu extrême et sert les recherches en glaciologie, en climatologie, en chimie atmosphérique et en géophysique pour ce qui concerne la thématique environnement, mais aussi en astronomie, planétologie ou médecine. L'infrastructure est gérée par l'Institut Polaire français Paul-Émile Victor (IPEV) pour la

22. http://www.safire.fr/fr/

23. EUropean Facility for Airborne Research, association internationale sans but lucratif de droit belge (AISBL).

24. https://www.institut-polaire.fr/ipev/infrastructures/les-bases/concordia/

France. Elle accueille également des expérimentations technologiques en températures extrêmes, abrite des études sur la médecine et le comportement humain en milieu confiné, et sert d'appui à plusieurs services nationaux d'observation du CNRS. Concordia inclut l'environnement logistique nécessaire dont le navire ravitailleur brise-glace Astrolabe et les convois terrestres sur glace.

L'institut polaire français IPEV opère **des stations de recherche polaires** autres que la TGIR Concordia. Il s'agit de la station historique côtière Dumont d'Urville en Antarctique, des îles subantarctiques de Crozet, Kerguelen et Amsterdam/St Paul sous administration des Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF) et enfin de la station AWIPEV, opérée conjointement avec l'Allemagne (Alfred Wegener Institute) au Svalbard.

© Concordia

• **Consortium ECORD/IODP (TGIR[25])**. La participation française à ce consortium pour lequel la convention actuelle se termine en 2023, donne accès aux chercheurs français à trois plateformes de forage en mer, en support des recherches sur le climat, la biodiversité et le forçage environnemental des écosystèmes marins, les processus profonds de la Terre interne et leur impact en surface ainsi que l'étude des risques telluriques.

© ECORD

Ces quatre infrastructures logistiques sont complétées par l'observation par **satellites**. Le Centre national d'études spatiales (CNES), l'agence spatiale française, ses homologues européens et internationaux, et l'agence spatiale européenne (ESA) portent une politique ambitieuse en observation scientifique de la Terre et en suivi environnemental opérationnel. En ce qui concerne le suivi opérationnel, le dispositif s'est progressivement enrichi depuis les premiers satellites météorologiques dans les années 1960, et notamment depuis 2014 avec les diverses missions Sentinel du programme européen **Copernicus** de surveillance de la planète depuis 2014. Ce volet spatial est évidemment de première importance pour le domaine de l'environnement et est bien pris en compte dans les infrastructures de recherche pour le traitement des données d'observation et la mise à disposition de produits qui en sont issus (DATA TERRA). Ces infrastructures

d'observation par satellites font l'objet d'une programmation spécifique qui ne concerne pas exclusivement le domaine sciences du système Terre et de l'environnement. Elles ne seront pas détaillées dans ce document. Le CNES dispose également d'une capacité **d'aérostats** performants (ballons stratosphériques ouverts, ballons légers dilatables, ballons pressurisés stratosphériques).

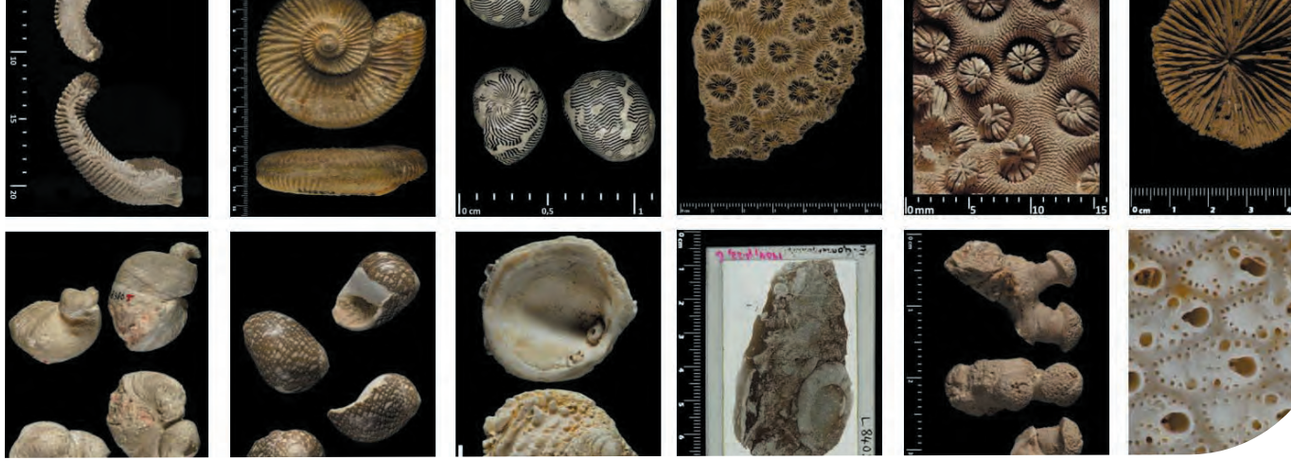
Pour les analyses minéralogiques et géochimiques des matériaux, les chercheurs français ont accès à deux synchrotrons sur le territoire national : European Synchrotron Radiation Facility **(ESRF)** avec des lignes spécialisées (FAME – French Absorption beamline in Material and Environmental science) et **Soleil**, l'un et l'autre inscrits sur la feuille de route nationale parmi les TGIR du domaine Sciences de la matière et ingénierie. Une série d'équipements mi-lourds de géochimie (accélérateurs de particules ARTEMIS et ASTER ; service national des sondes ioniques de Nancy ; plateau technique d'analyses isotopiques du MNHN ; ICP-MS de l'École Normale Supérieure de Lyon), ainsi que le Service d'Analyse des Roches et des Minéraux de Nancy (SARM), sont regroupés sous le label « Instruments nationaux » par le CNRS, au titre de leurs activités de service et de développement analytique pour l'ensemble de la communauté. Partant de ce premier cercle d'instruments, le projet d'infrastructure **RéGEF** (Réseau Géochimique et Expérimental Français) vise à mettre en cohérence, impulser et valoriser l'important parc instrumental français en géochimie analytique et expérimentale. Il regroupe des plateformes nationales et des laboratoires spécialisés. Il s'agira à terme de partager les moyens analytiques au sein des communautés scientifiques françaises, comme cela a déjà été mis en œuvre en géophysique, et ainsi progresser dans les capacités de traçage et de caractérisation des processus qui affectent notamment la surface de notre planète.

Par ailleurs, les chercheurs français ont aussi accès à d'autres moyens nationaux non-inscrits comme infrastructures sur la feuille de route 2018. Par exemple, la division technique de l'Institut des Sciences de l'Univers (INSU) du CNRS opère plusieurs parcs instrumentaux mis à la disposition de la communauté scientifique dont les planeurs sous-marins [Parc National Glider créé en partenariat avec le Centre Européen de Technologies Sous-Marines/Ifremer et le concours de la Direction Générale de l'Armement (DGA), l'IRD et Sorbonne Université] pour des programmes d'observation de l'océan côtier et hauturier ou pour des études de processus spécifiques (par exemple, suivi de structures mésoÉchelles diverses telles que fronts et tourbillons).

La communauté française dispose de moyens de **carottage** pour le domaine continental et glaciaire (cf. § I.3), ainsi qu'en domaine marin via la FOF (carottier Calypso pour des prélèvements sédimentaires tubulaires entre 3 et 70 m de profondeur, sur le navire océanographique Marion Dufresne).

Pour le calcul scientifique et la modélisation, les chercheurs français utilisent des infrastructures labélisées dans d'autres domaines scientifiques comme les calculateurs du **Grand Équipement National de Calcul Intensif** (**TGIR GENCI**). Dans le domaine de la bioinformatique, **l'Institut Français de Bioinformatique (IR IFB)** déploie des ressources et des services pour les communautés des sciences de la vie et de la bioinformatique. Elle constitue le nœud français **d'ELIXIR,** une infrastructure ESFRI de partage d'équipements et de données dans le domaine des sciences de la vie (santé, environnement, agronomie et recherche fondamentale).

Enfin, les moyens opérationnels de surveillance de l'environnement mis en place par l'État fournissent également – et plus encore aujourd'hui avec l'effort d'ouverture des données de recherche (science ouverte, open data) – des données d'observation régulière du territoire national (données météorologiques, données forestières, banque du sous-sol, données historiques de risques naturels, prises de vue aériennes, etc.).



3/ COLLECTIONS D'ÉCHANTILLONS BIOLOGIQUES ET GÉOLOGIQUES ET DOCUMENTS HISTORIQUES

Les collections peuvent apporter aux études environnementales une profondeur temporelle puisqu'elles conservent parfois jusqu'à plusieurs siècles de collectes. Cependant, les collections biologiques disposent rarement d'échantillons en séries longues et continues, c'est-à-dire de spécimens récoltés dans les mêmes conditions sur de longues périodes (au-delà du demi-siècle). Les collections d'échantillons géologiques et pédologiques, difficiles d'accès (carottage) ou rares, sont indispensables mais en nombre insuffisant pour étudier les dynamiques du système Terre sur le temps long. Comme en archéologie, les collections ont été constituées selon des problématiques scientifiques variées au cours de différents projets. L'exploitation des spécimens anciens ou des archives géologiques au sens large reste encore très incomplète.

Des utilisations nouvelles des collections se développent, notamment dans les domaines de la chimie, du climat ou de la santé. Par exemple, des travaux sur des séries longues, issues de collections provenant de l'étude bio-historique portant sur les papillons, ont permis d'estimer les changements environnementaux intervenus au travers de l'analyse de la perte de la biodiversité locale dans deux départements de l'Ouest de la France[25].

D'autres séries, constituées pour un objectif de systématique zoologique ou botanique, acquièrent un intérêt supplémentaire pour qualifier les milieux et leur évolution (géochimie des coquilles ou analyse des feuilles par exemple).

Une véritable stratégie d'acquisition reste encore à mener pour certains types d'échantillons alors que d'autres font déjà l'objet d'une collecte systématique et raisonnée. Les propriétés des sols de France, réactualisées tous les 15 ans, avec une gestion et une conservation des sols est un exemple (programme RMQS du GIS SOL).

25. Perrein C., 2012. – Biohistoire des papillons. Diversité et conservation des lépidoptères rhopalocères en Loire-Atlantique et en Vendée. Presses Universitaires de Rennes, Rennes. 621 p.

Certaines collections, non référencées dans les structures nationales et pourtant organisées selon des standards reconnus, ont néanmoins les caractéristiques des infrastructures de recherche : services, développements méthodologiques, formation et diffusion des données. Ces « infrastructures de collections » permettent d'explorer des chroniques longues, de disposer d'échantillons de référence pour la systématique mais aussi pour l'identification des modifications par l'Homme des matériels génétiques, pédologiques ou géologiques (par exemple les échantillons avant l'émergence des CRISPR26, la dynamique des contaminants, etc.). Le référencement de ces échantillons et ressources contribue à la science ouverte en permettant à l'ensemble des communautés d'accéder à un patrimoine scientifique, voire à la « science de la preuve » (pratique de recherche fondée sur les preuves) et de la reproductibilité, certains résultats ne pouvant être publiés que sur la base de l'existence d'échantillons traçables et réutilisables.

26. Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats

Exochus tutor-Holotype

• Le Réseau des Collections Naturalistes (RECOLNAT[27]) est une infrastructure de recherche qui figure sur la feuille de route nationale. Son périmètre concerne toutes les collections d'histoire naturelle (herbiers, animaux naturalisés, fossiles, roches et minéraux). Les collections, avec environ 100 millions d'objets naturalistes en France et un milliard au niveau européen, constituent un patrimoine scientifique et notamment une archive de la biodiversité, fournissant des informations sur la répartition des espèces dans l'espace et dans le temps[28]. A l'origine financé par le 1er programme d'investissement d'avenir (projet e-ReColNat), RECOLNAT proposait, en 2019, un portail de près de onze millions d'images et de données d'objets naturalistes issus des spécimens de collections nationales. L'infrastructure développe à partir des images des projets de science participative

27. https://www.recolnat.org/fr/

28. D'un point de vue administratif, les institutions qui conservent les collections « naturelles » se caractérisent par une grande diversité : le Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN), des universités, des collectivités territoriales (dont la majorité des Musées d'Histoire Naturelle), des sociétés savantes et, plus rarement, des sociétés commerciales. Afin de pouvoir valoriser tous ces ensembles et les données environnementales afférentes, un exercice d'inventaire global, qui dépasse le strict cadre des collections soumises à la loi sur les musées de France, a été initié par RECOLNAT dans le domaine des herbiers.

Les infrastructures de recherche du domaine des sciences du système Terre et de l'environnement en France et en Europe

(« Les herbonautes[29] ») et propose des outils comme l'outil Annotate d'annotation d'images pour les sciences naturelles[30]. Son périmètre s'est élargi à la structuration des communautés d'histoire naturelle et un groupement d'intérêt scientifique (GIS-Recolnat), regroupant plus de 50 membres, est en cours de constitution en 2020. A l'avenir, dans le cadre du développement de l'infrastructure RECOLNAT, d'autres disciplines devraient enrichir l'offre d'images, particulièrement en entomologie et en paléontologie.
RECOLNAT constitue le point nodal français de l'infrastructure européenne DiSSCo (Distributed System of Scientific Collections), inscrite sur la feuille de route européenne ESFRI en 2018 et regroupant actuellement 21 pays et 115 institutions. DiSSCo vise à coordonner les informations sur la biodiversité et la géo-diversité des collections avec comme objectif, à l'échelle européenne, de transformer un paysage fragmenté en une infrastructure de recherche cohérente et réactive.

© RARE

29. http://lesherbonautes.mnhn.fr

30. Annotate permet d'opérer des mesures physiques et d'identification dans des planches d'herbier numérisées, des images de zoologie, de paléontologie, mais aussi pour toute autre image (https://www.recolnat.org/fr/annotate).

• L'infrastructure RARe[31] (rassemblant les Centres de Ressources Biologiques (CRB), regroupe les collections de ressources biologiques, agronomiques ou pouvant contribuer à l'agronomie au sens large. Il s'agit de collections « respirantes » ou *ex situ*, de différents tissus, cellules, molécules ayant un statut de CRB reconnu dans les domaines des animaux et apparentés sauvages (terrestres comme aquatiques, arthropodes, mollusques, poissons, oiseaux, mammifères), des plantes et apparentées sauvages, des arbres forestiers, des bactéries et levures, consortia bactériens, et des entités de l'environnement (arthropodes, consortia microbiens…). Les CRB sont reconnus selon des normes nationales et internationales, pour leur activité de conservation, de caractérisation et de distribution de ressources de toute nature, du matériel génomique jusqu'aux individus. RARe est complémentaire de RECOLNAT car elle n'a pas une vocation première patrimoniale ou d'exhaustivité, ou de chronologie. En effet, elle est dédiée à appuyer les recherches orientées vers la connaissance de la biodiversité et son usage, vers l'innovation variétale, la sélection génétique des animaux, la biotechnologie, le biocontrôle… Elle dispose également de collections d'intérêt environnemental en raison des caractéristiques de certaines collections (chronique longue, biodiversité, consortia microbien de milieux comme les sols, espèces apparentées sauvages, ressources biologiques et génomiques antérieures à l'émergence des technologies de manipulation du génome – transgénèse, mutagénèse dirigée, édition du génome).

31. https://www.agrobrc-rare.org/

L'analyse des ressources génomiques des sols de différents observatoires, en particulier du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (GIS SOL), géré par INRAE, qui couvre tout le territoire national, est intégré dans l'infrastructure RARE. Ce dispositif offre aux communautés scientifiques une cartographie fine et réactualisée, tous les 10 ans, des sols en France. Elle permet également une réanalyse des échantillons, par exemple pour la recherche de polluants ou des analyses de métagénomique des sols.

• **Le centre national de ressources biologiques marines (EMBRC-France[32])** est un point d'entrée pour l'accès aux ressources biologiques marines pour les communautés en biologie, écologie et océanographie ainsi que les entreprises de la « bioéconomie bleue » (voir aussi § I.5).

• **Des « carothèques »,** rassemblent les carottes sédimentaires (marines, lacustres) et glaciaires, utilisées pour l'essentiel dans la reconstitution des paléoclimats et des paléo-environnements. Ces carothèques sont actuellement distribuées et gérées entre les différents organismes et établissements sur des bases différentes. Signalons qu'à partir de 2021, le stockage à long terme (pour un usage scientifique par les générations futures) de carottes issues de calottes polaires antarctiques et groenlandaises ou encore des glaciers de montagne, menacés par le réchauffement climatique, sera réalisé sur le plateau antarctique (3233 m d'altitude) à 10 mètres de profondeur dans la neige, à la station Concordia (projet international Ice Memory sur initiative franco-italienne, géré financièrement par la fondation de l'Université Grenoble Alpes).
Les données correspondant aux carottes, qu'elles soient sédimentaires ou glaciaires, sont actuellement rassemblées dans un premier portail commun (cyber-carothèque[33]) présentant les métadonnées associées aux carottes. Pour améliorer l'accès aux échantillons et aux données, une réflexion nationale a

32. https://www.embrc-France.fr/fr

33. https://cybercarotheque.fr/

Les infrastructures de recherche du domaine des sciences du système Terre et de l'environnement en France et en Europe

été initiée en 2019 par le ministère en charge de la recherche pour la création d'un portail unique des métadonnées visant à unifier les différents référencements effectués par chaque organisme.

Quant à la collecte de carottes, en complément de l'existant[34], les moyens nationaux de carottage dans les océans, sur les continents ou sur glace ont fait l'objet d'un projet d'équipement d'excellence (EQUIPEX CLimcor - paleoCLIMatic CORing : High Resolution and Innovations) du programme d'investissement d'avenir visant à développer les moyens technologiques de prélèvements.

Dans le domaine des projets nationaux pour le stockage des déchets radioactifs dans le sous-sol, la reconnaissance géologique de formations imperméables/peu perméables a conduit l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets RAdioactifs (ANDRA) à effectuer des forages profonds et des mesures environnementales. Pour la préservation des échantillons prélevés et leur mise à disposition à la communauté scientifique, deux installations de stockage (carothèque et écothèque) de l'Observatoire Pérenne de l'Environnement – OPE (ANDRA) ont été mises place il y a plus de 20 ans.

D'autres lithothèques et souchothèques existent sur le territoire et sont gérées au niveau local par des organismes de recherche et des universités. Leur vocation est à la fois scientifique et pédagogique.

Enfin, la cartographie historique du territoire et le patrimoine photographique apportent des éléments d'observation de l'évolution du territoire à l'échelle de quelques décennies à quelques siècles. La structuration de ce patrimoine en vue de sa numérisation et de son exploitation scientifique est engagée, par la communauté SHS, dans le cadre de l'infrastructure de recherche Huma-Num (Humanités Numériques). Elle se développe également à l'échelle européenne, pour des usages à la fois scientifiques (SHS, environnement) et opérationnels (aménagement, tourisme)[35].

34. Par exemple, le centre de carottage et de forage national du CNRS, le Centre de Carottage et de Forage National-C2FN…

35. Projet H2020-EU.1.2.3. - FET Flagships Time Machine.

© ACTRIS

4/ DOMAINE : ATMOSPHÈRE

Pour le domaine atmosphérique, les infrastructures de recherche viennent en support aux activités scientifiques sur le climat, la composition atmosphérique et le cycle du carbone, trois enjeux majeurs des sciences du système Terre et de l'environnement.

La composition atmosphérique est considérée sous l'angle des facteurs de forçage climatique, avec les principaux gaz à effet de serre (GES) dont les concentrations sont fortement modifiées par les émissions anthropiques (dioxyde de carbone-CO2, méthane-CH_4 et protoxyde d'azote-N_2O), les gaz réactifs (ozone-O_3, oxydes d'azote-NOx) et la vapeur d'eau, mais également sous l'angle de la qualité de l'air avec les aérosols et les composés organiques volatils et particulaires. L'étude de la composition de l'atmosphère nécessite à la fois des sites instrumentés, des stations d'observation (fixes ou mobiles) et des développements instrumentaux et méthodologiques.

Au niveau national, en tenant compte des infrastructures logistiques, SAFIRE et Concordia (cf. § I.2), largement exploitées pour leurs capacités de recherche en sciences de l'atmosphère, on dénombre sur la feuille de route nationale trois infrastructures de recherche :

• IR ACTRIS-France[36] pour les nuages, gaz réactifs et aérosols.
• IR IAGOS-France[37] pour la composition atmosphérique au niveau de la troposphère.
• TGIR ICOS-France[38] pour les gaz à effet de serre.

36. Aerosol, Cloud and Trace Gases Research Infrastructure–France. https://www.actris.fr/.
37. In-service Aircraft for Global Observing System–France. https://www.iagos.org/.
38. Integrated Carbon Observation System–France. https://www.icos-France.fr/.

• **ACTRIS-France** est une IR distribuée pour l'observation et l'exploration des aérosols, des nuages et des gaz réactifs et de leurs interactions, en support des recherches sur le climat et la qualité de l'air. Elle permet d'améliorer la compréhension de l'évolution passée, présente et future de la composition atmosphérique. Elle offre des possibilités d'accès à des plateformes technologiques d'exploration et d'expérimentation pour les secteurs publics et privés.

© IAGOS

• **IAGOS-France (IR)** est un ensemble d'instruments embarqués sur des avions de lignes commerciales, permettant un faisceau d'observations à long terme (plusieurs décennies) de la composition atmosphérique en gaz et aérosols (O_3, CO, NO_x, CO_2, CH_4, vapeur d'eau) dans la troposphère, notamment dans la haute troposphère (9-13 km d'altitude).

© ICOS

• **La ICOS-France** (TGIR; cf. § I.5 & I.6 domaines : océans et écosystèmes), est le réseau de mesure des GES (CO_2 et CH_4 mesurés en continu) fournissant des données de haute précision au service de la recherche sur le changement climatique. ICOS présente la spécificité d'être transversale aux différents compartiments environnementaux (atmosphère, océans, écosystèmes). Ces mesures atmosphériques en continu permettent de quantifier sur le long terme le cycle des principaux gaz à effet de serre, à différentes échelles (globale à régionale). Au niveau européen, l'ERIC ICOS porte le projet H2020 ENVRIplus (Figure 1). Le réseau ICOS Atmosphère suivi par les équipes françaises comporte 16 sites.

A noter que le CNES dispose aussi d'une flotte de ballons :

- Ballons Stratosphériques Ouverts (BSO) : une campagne annuelle de 4 à 5 vols est organisée chaque année à Timmins (Canada) ou à Kiruna (Suède), voire sur d'autres sites. Les missions scientifiques concernent principalement l'étude de l'atmosphère au moyen de différents instruments de spectrométrie laser ou de prélèvement *in situ*, ou l'astrophysique.

- Ballons Légers Dilatables (BLD) stratosphériques : ils sont lancés régulièrement depuis Aire-sur-l'Adour (Landes) avec des charges utiles légères (< 3kg), pour l'étude de l'atmosphère ou des essais technologiques. Ils sont également déployables lors des campagnes « Ballons » en appui au lancement d'autres types de ballons.

- Ballons Pressurisés Stratosphériques (BPS) : le projet STRATEOLE 2, mené en collaboration, prévoit des flottilles de BPS (Ballons de très longue durée – 3 mois typiquement) pour l'étude de la dynamique et de la chimie de la basse stratosphère équatoriale. La campagne probatoire s'est déroulée avec succès fin 2019 et les campagnes scientifiques sont programmées lors des hivers 2021/2022 et 2024/2025.

- Ballons Pressurisés de Couche Limite (BPCL) : ces ballons dérivant à une altitude cible dans la couche limite atmosphérique ou dans la basse troposphère libre emportent une charge utile légère pour l'étude de la dynamique ou de la chimie atmosphérique. Ils ont été largement déployés en 2012-2013 en Méditerranée occidentale dans un domaine d'altitude compris entre 0,2 et 3,4 km lors de projets du programme MISTRALS, et ont démontré leur capacité unique à effectuer un monitoring quasi-lagrangien à grande distance. Mis en sommeil depuis, ils font l'objet de nouvelles demandes de campagnes trans-océaniques.

L'ensemble des données (sol, satellites ou véhicules aéroportés) est mis à disposition des communautés (recherche ou applications commerciales), par DATA TERRA et sa composante AERIS pour l'atmosphère (cf. § I.8 Pôles de données).

En plus de ces infrastructures d'acquisition de données *in situ*, la France dispose d'une infrastructure pour la réalisation de simulations climatiques de référence (CLIMERI-France). Cette infrastructure de modélisation du climat développe les versions de référence des modèles de climat français et réalise des simulations numériques internationales de référence du programme mondial de recherches sur le climat aux échelles globales et régionales (WCRP[39]). Elle met à disposition leurs résultats pour diverses communautés d'utilisateurs de la recherche dans le cadre de services climatiques. Ces expériences constituent une des bases scientifiques pour les rapports du GIEC[40]. CLIMERI-France s'appuie sur les deux plateformes françaises de modélisation du climat, celle de l'Institut Pierre-Simon Laplace et celle de Météo-France et du Cerfacs. Cette infrastructure est en lien étroit avec les infrastructures au niveau européen et international.

À l'échelle européenne, quatre infrastructures composent le paysage:

- Une infrastructure en cours de construction : ACTRIS, entrée sur la feuille de route européenne ESFRI en 2016.

- Trois infrastructures de statut Landmark sur la feuille de route ESFRI :
  - IAGOS (statut AISBL[41] en 2014).
  - ICOS (statut d'ERIC en 2015)
  - EISCAT[42]-3D dans laquelle la France ne participe qu'au conseil scientifique international.

39. WCRP : World Climate Research Program.
40. GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
41. AISBL : Association Internationale Sans But Lucratif de droit belge.
42. Next generation European Incoherent Scatter radar system.

On peut aussi ajouter des projets européens d'INFRAIA (*Integrating Activity*) du programme cadre H2020 :

- HEMERA 2020 : Integrated access to balloon-borne platforms for innovative research and technology) pour le développement de l'accès transnational aux ballons stratosphériques pour des observations atmosphériques et astrophysiques, et dans laquelle DATA TERRA (pôle AERIS) est en charge de la mise en place du centre de données et du site institutionnel.

- IS-ENES3[43] (3ème phase du projet Distributed e-infrastructure of the European Network for Earth System Modelling), coordonné par la France, soutient la contribution européenne au développement et au fonctionnement de la base de données internationale des simulations (Earth System Grid Federation) ainsi que le partage de logiciels et d'expertise autour des modèles de climat. Ce projet est en lien étroit avec l'infrastructure nationale CLIMERI-France.

- EUROCHAMP2020 (Advanced European atmospheric simulation chambers) représentant le volet « expérimentation » d'ACTRIS.

- ARISE (Atmospheric dynamics Research InfraStructure in Europe) consacré à la dynamique de l'atmosphère avec des mesures calibrées haute résolution de paramètres dynamiques de l'atmosphère moyenne (stratosphère-mésosphère) pour améliorer les modèles de climat et les prévisions météorologiques à moyen terme, et développer de nouveaux services pour la sécurité civile.

43. InfraStructure for the European Network for Earth System Modelling. https://is.enes.org. Sylvie Joussaume (CNRS) a été lauréate du prix des Etoiles de l'Europe 2018 pour la coordination de l'infrastructure IS-ENES2.

À ce panorama national et européen, il faut ajouter une organisation internationale, le CEPMMT[44] : il s'agit d'une organisation intergouvernementale indépendante créée en 1975 et actuellement financée par 34 États. C'est à la fois un institut de recherche et un service opérationnel qui développe son système global de Prévision Numérique du Temps (PNT) et l'opère 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 pour élaborer et diffuser ses produits. Son centre de calcul et de données (ainsi que l'ensemble de l'archive correspondante) est accessible à tous ses membres pour leurs activités de recherche. De ce fait, le CEPMMT est aussi un outil important pour la recherche sur le climat et réalise notamment des ré-analyses du climat récent, basées sur son système de PNT et l'ensemble des observations passées disponibles. Par ailleurs, le CEPMMT coordonne et met en œuvre les services « atmosphère » (chimie de l'atmosphère, qualité de l'air, émissions de GES) et « changement climatique » du programme Copernicus de l'Union Européenne.

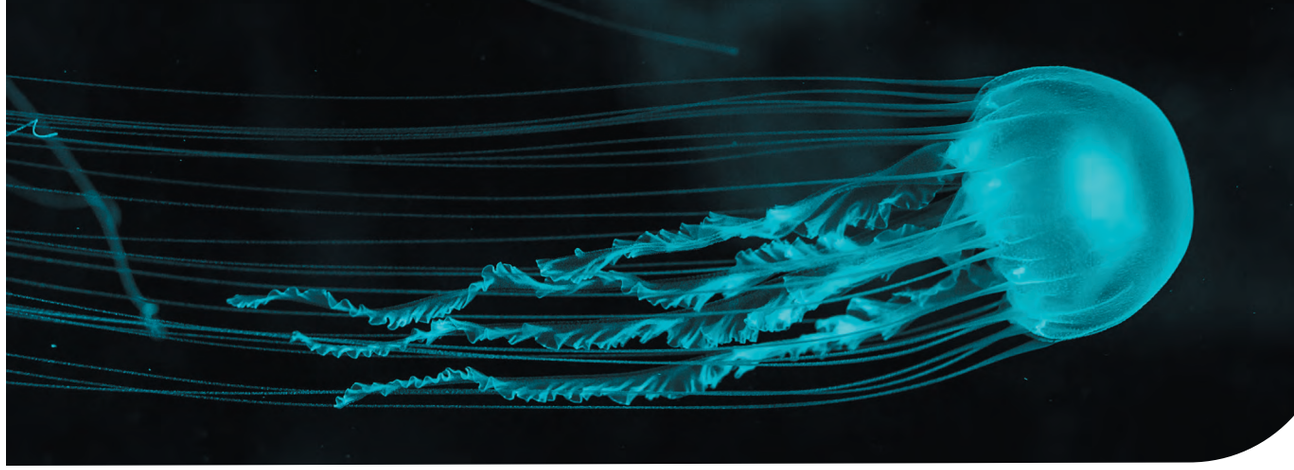
Enfin, les infrastructures du domaine atmosphérique ont été actives dans le cluster européen ENVRIplus, ce qui a permis d'une part de mener

44. Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme

des développements communs et, d'autre part, d'avancer dans les efforts d'harmonisation des mesures et de gestion des données avec l'ensemble des infrastructures européennes en environnement.

EN RÉSUMÉ

Les infrastructures de recherche du domaine atmosphérique viennent en support aux activités scientifiques sur le climat, la composition atmosphérique et le cycle du carbone. Au niveau national, en plus des infrastructures logistiques, SAFIRE et CONCORDIA, trois infrastructures d'observation, ACTRIS, IAGOS et ICOS, sont impliquées. A ces infrastructures s'ajoutent CLIMERI-France pour les simulations climatiques et le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT).

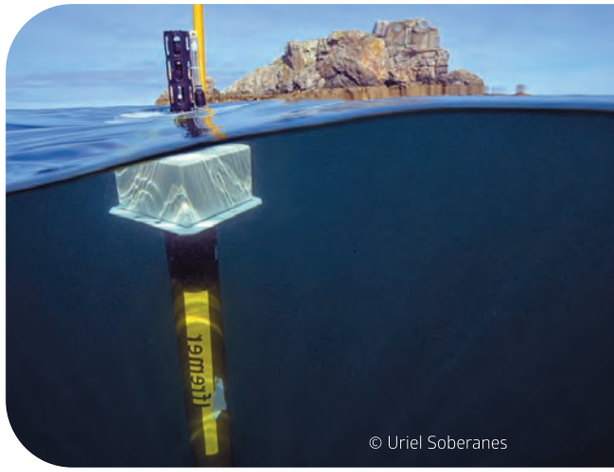


5/ DOMAINE : OCÉANS

Les sciences marines recouvrent un ensemble de disciplines (biologie, géologie, écologie, hydrodynamique, biogéochimie, océanographie…), essentiel à la compréhension du fonctionnement et de l'évolution des mers et des océans. Ces sciences se déclinent sur une large gamme d'échelles, spatiales et temporelles, allant de l'océan global à la microstructure et du siècle à la seconde. Les infrastructures de recherches françaises du domaine océanique reflètent donc ces diversités et cette interdisciplinarité. Elles sont, pour la plupart, liées à des infrastructures européennes ou à de grands programmes de recherche internationaux. Ce domaine est étroitement lié aux grands moyens logistiques tels que :

- la TGIR Flotte Océanographique Française (cf. § I-2).

- la TGIR Concordia, qui inclut l'Astrolabe, un navire brise-glace de ravitaillement en Antarctique opéré par l'IPEV, utilisé aussi pour des valorisations océanographiques de transit 120 jours par an entre Hobart (Tasmanie) et la Terre Adélie en Antarctique ou de courtes campagnes côtières.



© Uriel Soberanes

• **Euro ARGO[45] (TGIR)** pour étudier le fonctionnement physique et chimique de l'océan global, **le programme international ARGO[46]** a été mis en place en 2000 par la Commission Océanique Intergouvernemental de l'UNESCO (COI) et l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Il gère actuellement un réseau de presque 4 000 flotteurs profilants autonomes (mesures de la température et de la salinité de l'eau de mer jusqu'à 2 000 m de profondeur et une nouvelle génération d'instruments autonomes capables de plonger jusqu'à 4 000 voire à 6 000 m de profondeur). C'est le premier réseau *in situ* global d'observation des océans en temps réel, complémentaire des systèmes satellitaires,

45. https://www.euro-argo.eu/

46. https://www.euro-argo.eu/

pour observer, comprendre et prévoir l'océan et son rôle sur le climat. Il est structuré au niveau européen par l'ERIC EURO-ARGO et en France par la TGIR du même nom. La France, troisième contributeur mondial au réseau, joue un rôle important dans ce programme (i) en hébergeant un des deux centres mondiaux de données ; (ii) en tenant une place de leader sur les mesures biogéochimiques ; et (iii) en pilotant l'ERIC EURO-ARGO.

© EMSO

• **EMSO-France**[47] est le nœud français de l'infrastructure européenne EMSO qui est une entité juridique de droit européen ERIC. Son objectif est d'étudier, sur le long terme et en temps réel, en milieu marin profond, les processus environnementaux liés aux interactions entre la géosphère, la biosphère et l'hydrosphère, notamment les risques naturels. Il est composé de différents observatoires fixes, situés en eaux profondes ou dans la colonne d'eau, déployés dans les mers tout autour de l'Europe, de l'Arctique à l'Atlantique, de la Méditerranée à la mer Noire.

47. European Multidisciplinary Seafloor and Water Column Observatory, http://emso.eu/

© ICOS

• **ICOS-France**[48] (cf. § I.4 & I.6, domaines : atmosphère et écosystèmes), portant sur le cycle du carbone, les flux et concentrations atmosphériques et des eaux de surface océaniques en GES, comporte une composante marine autour de mesures de CO_2 dissous océanique. ICOS présente la spécificité d'être transversale aux différents compartiments environnementaux (atmosphère, océans, écosystèmes).

48. Integrated Carbon Observation System–France; https://www.icos-France.fr/

• **L'Infrastructure de Recherche LIttorale et CÔtière (ILICO**[49]**)** vise à observer et comprendre les milieux et les écosystèmes côtiers et marins dans leur globalité (physique, biologie, sédimentologie). Ainsi, ILICO regroupe un ensemble de dispositifs d'observation permettant de collecter des échantillons et de déployer différents instruments de mesure en fédérant 8 services d'observation que sont : COAST HF, CORAIL, DYNALIT, MOOSE, PHYTOBS, ReefTemps, SOMLIT et SONEL (Figure 2).

© ILICO

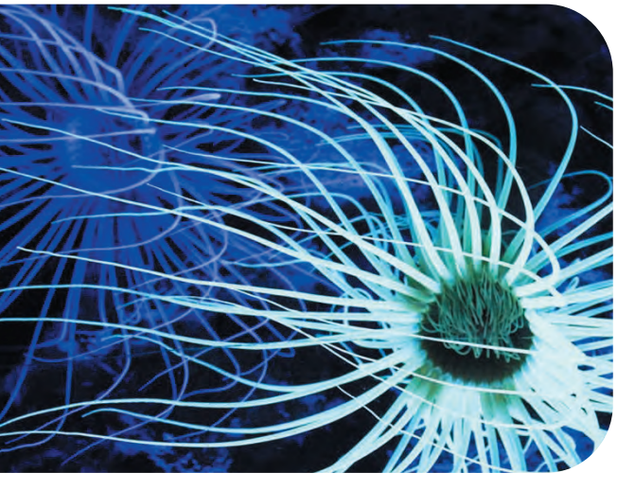
FIGURE 2 L'IR ILICO ET SES RÉSEAUX ÉLÉMENTAIRES

COAST HF (Coastal ocean observing system - High frequency), CORAIL (Service d'observation des récifs coralliens de Polynésie française), DYNALIT (Dynamique du littoral et du trait de côte), MOOSE (Mediterranean ocean observing system for the environment), PHYTOBS (Réseau d'observation du phytoplancton), ReefTemps (Réseau d'observation des eaux côtières du Pacifique insulaire), SOMLIT (Service d'observation en milieu littoral), SONEL (Système d'observation du niveau des eaux littorales).

49. https://www.ir-ilico.fr/

La réalisation de suivis à long terme permet également de faciliter la compréhension et l'anticipation de certains processus à grandes échelles qui peuvent impacter les zones côtières et littorales (quantification de l'impact de certains événements extrêmes ou intermittents tels que les tsunamis ou les cyclones).

Les projets européens JERICO (FP7, 2011-2015 ; JERICO-NEXT H2020, 2015-2019 ; JERICO-DS 2019-2020 ; JERICO-S3, 2019-2022) fédèrent une communauté d'établissements scientifiques européens, impliqués dans l'observation côtière et littorale, pour la mise en place d'une infrastructure européenne portée par la France (JERICO-RI), proposée à l'Europe pour la mise à jour 2021 de la feuille de route ESFRI. Cette infrastructure implémentera la partie côtière du futur European Ocean Observing System (EOOS).



• Dans le domaine de la biologie marine, **le centre national de ressources biologiques marines (EMBRC-France)**, rassemblant les 3 stations marines opérées par le CNRS et Sorbonne-Université (Banyuls-sur-Mer, Roscoff, Villefranche-sur-Mer), vise à répondre aux questions fondamentales relatives à la santé des écosystèmes océaniques dans un environnement en mutation et fournit des installations et des plateformes pour étudier les organismes marins et les écosystèmes. EMBRC-France est un point d'entrée pour l'accès aux ressources biologiques marines. EMBRC-France, labélisé dans le domaine Biologie-Santé sur la feuille de route nationale, est intégré à l'infrastructure européenne ESFRI EMBRC qui a un statut d'ERIC.

• **L'infrastructure CLIMERI-France** inclut la réalisation de simulations de référence pour le domaine océanique, à la fois pour la compréhension des mécanismes qui opèrent dans les océans et pour étudier le rôle des océans dans le climat. On peut noter par exemple la possibilité d'estimer l'impact de différents scénarios climatiques sur le niveau des mers, les projections de productivité marine ou d'acidification des océans.

Il existe d'autres infrastructures ou réseaux européens avec participation française, mais sans structuration nationale en miroir. Citons :

- LIFEWATCH[50] (statut d'ERIC, dans lequel la France a un statut d'observateur[51]), qui aborde la biodiversité à travers différentes composantes dont l'une est marine, ainsi que son évolution dans le cadre du changement climatique.
- AQUACOSM, qui est un réseau de partage de plateformes (mésocosmes) pour l'étude des écosystèmes aquatiques, en domaine marin comme continental.

On notera aussi le démarrage en 2018 du projet EUMarineRobots, dont le but principal est de proposer une plateforme d'accès à une gamme complète de robots marins et aériens à tous les chercheurs européens, universitaires et industriels, afin de garantir leur utilisation optimale et leur développement commun. Enfin, la structure Coriolis (partagée par CNES, CNRS, Ifremer, IPEV, IRD, Météo-France et SHOM) gère l'acquisition, la validation et la distribution des données d'océanographie opérationnelle et contribue au service Copernicus marin.

Les données générées par ces infrastructures et celles propres aux autres compartiments de l'environnement nécessitent un accès facile et une interopérabilité pour favoriser les études interdisciplinaires : c'est l'objectif du pôle de données et de services DATA TERRA, et de son portail national de données océaniques ODATIS. Les données d'observation *in situ* de l'océan servant à la fois les besoins de l'océanographie opérationnelle et de la recherche actuellement gérées dans Coriolis Côtier devraient par ailleurs s'intégrer à ODATIS. À l'échelle européenne, le projet SeaDatanet/SeaDataCloud ambitionne de mettre en réseau les centres de données nationaux, tandis que le réseau EMODNet vise à rendre ces données accessibles à la fois pour la recherche et des applications opérationnelles.

EN RÉSUMÉ

Le domaine océanique est couvert par des infrastructures logistiques (FOF, Concordia, ECORD-IODP) et des infrastructures d'observation (EMSO-France, EURO-ARGO, ILICO, ICOS-France, EMBRC-France). A terme, un projet d'infrastructure pour le domaine hauturier devrait compléter les dispositifs d'observation, permettant une vision globale (physique, chimique, biologique) de l'océan.

50. https://www.embrc-France.fr/fr

51. L'interaction de la France avec cette infrastructure est réalisée au travers des correspondants français des infrastructures nationales dans ENVRIplus et notamment dans le comité environnement d'ENVRIplus (BEERI). Les activités déployées dans le cadre de ce comité BEERI concernent l'optimisation de la synergie entre les différentes infrastructures du domaine, tant d'un point de vue conceptuel, que de co-localisation de sites et de compétences ou encore d'interopérabilité des données pour répondre aux enjeux sociétaux du changement global.

© OZCAR

6/ DOMAINE : HYDROSPHÈRE, ÉCOSYSTÈMES CONTINENTAUX ET SOLS

Pour l'étude des écosystèmes continentaux, plusieurs infrastructures de recherche nationales sont organisées autour de l'étude du fonctionnement de la zone critique et des grands bassins fluviaux, de la dynamique des populations et de leurs interactions entre eux et avec leur milieu de vie. Ancrées dans les enjeux scientifiques et sociétaux actuels, en lien avec des impacts et des combinaisons de pressions anthropiques et climatiques, les infrastructures de ce domaine permettent d'étudier une diversité de processus (hydrologiques, biogéochimiques, biologiques, écologiques, socio-économiques…) dans différents contextes pédoclimatiques. Les données correspondantes sont nécessaires pour élaborer une vision holistique du fonctionnement des différents compartiments physiques, biologiques et sociaux de ces systèmes et de leurs interactions, à différentes échelles spatiales et temporelles.

Une spécificité de ces infrastructures est leur large distribution sur le territoire métropolitain ainsi qu'en outre-mer. Des sites d'étude, couvrant les principaux écosystèmes continentaux (prairiaux, agricoles, montagnards, aquatiques et forestiers), sous différents climats (tempérés, tropicaux, alpins et polaires), sont également implantés en Amérique du Sud, Asie, Afrique ou en Sub-Antarctique et Antarctique. Cette distribution géographique étendue permet d'accéder aux principaux gradients climatiques et à des écosystèmes sensibles (littoraux, montagnards, polaires, désertiques), ce qui donne une position originale à la France par rapport à ses partenaires internationaux.

Ces infrastructures associent des sites instrumentés et des plateformes :

• **AnaEE-France NATURA**[52] est une infrastructure d'expérimentation in natura sur les écosystèmes continentaux terrestres et aquatiques. Il s'agit de comprendre les propriétés dynamiques de ces entités, la complexité des interactions à l'œuvre et développer le corpus fondamental nécessaire à la mise en place de mesures d'adaptation et de restauration. La caractérisation des écosystèmes requiert des technologies innovantes pour la mesure et l'enregistrement des variables relatives aux organismes, au sol et à la biodiversité, ainsi qu'aux flux de matière et d'énergie afin de les relier aux changements globaux. Des plateformes analytiques mobiles sont développées pour analyser de façon fine les différents compartiments des écosystèmes. AnaEE-France NATURA contribue, pour la France, au côté d'AnaEE-France ÉCOTRONS, au projet européen AnaEE. Une partie des dispositifs d'AnaEE dédiés aux écosystèmes aquatiques (PLANAQUA, LIFE) est également référencée dans le domaine marin ou celui des estuaires.

© ANAEE

52. https://www.anaee-france.fr

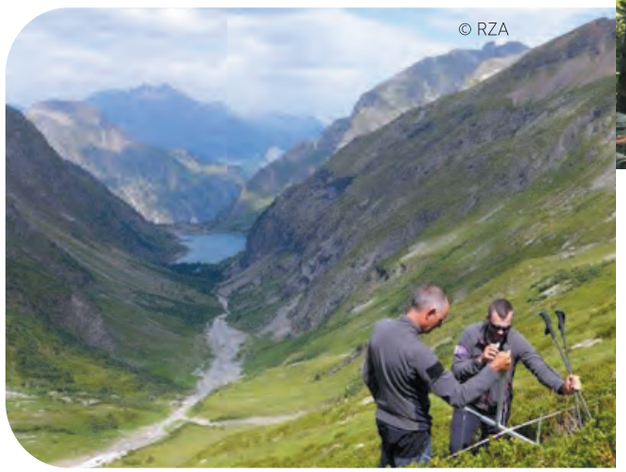
• **AnaEE-France ÉCOTRONS** est une infrastructure de recherche dédiée à l'expérimentation au travers de 5 plateformes expérimentales pour étudier des milieux terrestres et aquatiques sous une gamme de paramètres environnementaux hautement contrôlés. Ces plateformes sont mises à la disposition d'une large communauté scientifique (écologie, agronomie, biologie, géosciences), nationale et internationale. Elles permettent le suivi en continu des échanges de matière et d'énergie entre les compartiments de l'écosystème considéré et entre organismes. AnaEE-France ÉCOTRONS contribue, pour la France, au côté d'AnaEE-France NATURA, au projet européen AnaEE.

• **eLTER-France OZCAR**[53] est une infrastructure de recherche distribuée autour de 60 sites instrumentés *in situ*, en France et à l'étranger, qui conduisent des observations intégrées, à long terme, de la basse atmosphère, de l'eau, des glaces, des sols, des zones humides et de leur biodiversité. Elle permet de répondre aux grands enjeux scientifiques concernant une

53. https://www.ozcar-ri.org/fr/ozcar-observatoires-de-la-zone-critique-applications-et-recherche/

meilleure compréhension des stocks et des flux d'énergie et de matière (eaux, carbone, autres éléments), à la surface des continents, le long de gradients climatiques, topographiques, géologiques ou d'utilisation des terres. Les milieux abordés sont divers : bassins versants, aquifères, sols naturels et anthropisés (agrosystèmes, friches industrielles, villes), littoral, zones humides, zones enneigées et englacées (montagnes, zones polaires et subpolaires). L'infrastructure bénéficie de développements instrumentaux récents, notamment de plateformes mobiles innovantes[54], pour le suivi en continu, *in situ*, de paramètres physico-chimiques des eaux de rivière (River-lab, River truck). eLTER-France OZCAR contribue pour la France, aux côtés de RZA, à l'infrastructure de recherche européenne eLTER.

• **eLTER-France Réseau des Zones Ateliers (RZA)**[55] est une infrastructure distribuée en 14 zones ateliers permettant des recherches inter- et transdisciplinaires, à long terme, sur des socio-écosystèmes. Les zones ateliers s'organisent autour d'une unité fonctionnelle ancrée sur le territoire (fleuve et bassin versant associé, paysages – agricole ou urbain, écosystèmes, y compris en Antarctique et en Afrique) et de socio-écosystèmes variés (marins, montagnards, agricoles, fluviaux, etc.). Une démarche scientifique co-construite, pluri- et interdisciplinaire (sciences de la vie et de la terre, sciences de la vie, sciences humaines et sciences de l'ingénieur) est développée, en lien avec les acteurs émanant du monde des gestionnaires, des politiques et des associations, dans une démarche transdisciplinaire, pour répondre aux enjeux environnementaux et sociétaux actuels. eLTER-FRANCE RZA contribue pour la France, aux côtés d'OZCAR, à l'infrastructure de recherche européenne eLTER.



• **In-Sylva-France**[56] est une infrastructure nationale regroupant des réseaux d'expérimentation sur la gestion forestière pour répondre aux enjeux socio-économiques et environnementaux de l'adaptation des forêts aux changements globaux. Son originalité est de coupler les leviers sylvicoles, biogéochimiques et génétiques pour favoriser une vision intégrée de la sylviculture et d'élaborer une gestion adaptative et durable des peuplements forestiers. In-Sylva-France a pour vocation de développer des services pour les scientifiques et les gestionnaires. Elle vise à placer la France comme leader européen de la gestion forestière, contribuant ainsi au rayonnement économique de la filière.

54. cf. Equipex CRITEX : innovative equipment for the critical zone. https://www.critex.fr/

55. http://www.za-inee.org

56. https://www6.inrae.fr/in-sylva-france/

Enfin, dans le domaine « Hydrosphère, écosystèmes continentaux et sols », s'ajoutent :

- l'IR ILICO, déjà présentée pour le domaine océan (cf. § I.5) et qui mène des observations sur les milieux et les écosystèmes côtiers à l'interface continent-océan.

- la TGIR ICOS-France, infrastructure dédiés aux flux de GES et déjà présentée pour les domaines atmosphère et océan (cf. § I.4 & I.5). Elle a un centre thématique écosystèmes avec un réseau de sites instrumentés représentant les grands types de végétation : prairies, forêts, cultures et tourbières. Le réseau « écosystèmes » pour la France est constitué actuellement de 16 sites métropolitains et 2 sites en Guyane.

- L'IR CLIMERI-France, déjà présentée pour les domaines atmosphère et océans fournit des simulations de référence pour différents scénarios climatiques qui servent de base aux études d'impact du changement climatique sur la production agricole ou sur les risques en hydrologie. Ces études utilisent les composantes des modèles de climat ou des modèles d'impact dédiés.

La plupart de ces infrastructures proposent un système d'information et des outils de modélisation permettant une intégration des données pour produire des modèles et scénarios prédictifs qui intègrent les boucles de rétroactions entre les différents compartiments. Les données produites alimentent le PNDB (Pôle National de Données de Biodiversité) et DATA TERRA (Pôle de données et services du Système Terre).

Des dispositifs peuvent être co-localisés sur certains sites, à titre d'exemple, la station alpine du Jardin du Lautaret (ICOS-FRANCE, AnaEE-France NATURA, eLTER-France RZA et OZCAR), la tourbière de la Guette (ICOS-RANCE, eLTER-France OZCAR) ou la station des Nouragues en Guyane (ICOS-France, AnaEE-France NATURA).

Il existe d'autres infrastructures ou réseaux européens [dont plusieurs projets européens d'INFRAIA (Integrating Activity) du programme cadre H2020] avec une participation française, mais sans structuration nationale en miroir. Citons :

- LIFEWATCH, ERIC dans lequel la France a un statut d'observateur. Au-delà de sa composante marine, cette infrastructure d'observation de la biodiversité possède également des composantes terrestre et dulçaquicole.

- AQUACOSM, réseau de partage de

plateformes (mésocosmes) pour l'étude des écosystèmes marins et d'eau douce, auquel participe en particulier la plateforme MEDIMEER du CNRS et de l'Université Montpellier à Sète, AnaEE-France ÉCOTRONS (Equipex PLANAQUA), ou AnaEE-France NATURA (dispositifs LIFE - *Living in Freshwaters and Estuaries* - d'INRAE).

EN RÉSUMÉ

Les infrastructures du domaine « Hydrosphère, écosystèmes continentaux et sols » associent des sites instrumentés (sites d'ICOS-France pour l'étude des GES, eLTER-France OZCAR pour les cycles hydrologiques et biogéochimiques de la zone critique, eLTER-France RZA pour la recherche sur les socio-écosystèmes, ILICO pour l'interface terre-mer) et des sites et plateformes d'expérimentation (In-Sylva-France pour la forêt, AnaEE-France NATURA pour l'étude des écosystèmes *in situ* et AnaEE-France ÉCOTRONS pour l'étude des écosystèmes en conditions hautement contrôlées). Elles couvrent les principaux écosystèmes continent aux sous différents climats, usage des sols, à différentes échelles spatiales et temporelles. C'est un domaine qui privilégie l'interdisciplinarité et une vision systémique des objets d'étude afin de soutenir une démarche de durabilité des territoires. Ces infrastructures constituent, pour la plupart, les nœuds nationaux d'infrastructures du même nom, inscrites sur la feuille de route européenne (ESFRI)

© BRGM

7/ DOMAINE : GÉOSPHÈRE

Dans le domaine de la Terre interne, la France est très active avec six infrastructures contributrices sur la feuille de route 2018, dont deux de façon majeure : RESIF/EPOS et EMSO-France. Outre les enjeux de connaissances sur la structure et la dynamique interne de la Terre, les enjeux sociétaux sous-jacents au domaine de la géosphère sont nombreux (risques naturels, énergies, matières premières, stockage, etc.). Plusieurs de ces enjeux sont soutenus par des programmes de recherche H2020 : stockage du carbone (initiative internationale ACT pour la capture du CO_2), ressources minières (partenariat public-public ERA-NET Cofund ERA-Min), énergies (programme GEOTHERMICA), géologie (ERA-NET GeoERA), etc.

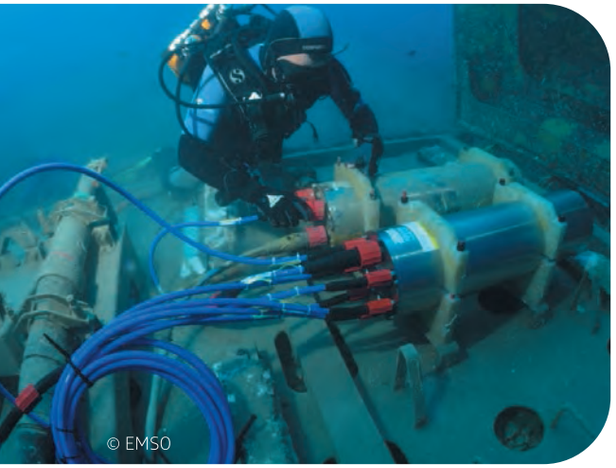
© RESIF

• **L'IR RESIF/EPOS**[57] regroupe les mesures de sismologie, de gravimétrie et de géodésie pour les déformations lentes. Elle contribue à l'ESFRI EPOS (European Plate Observing System) et coordonne la contribution française à cette infrastructure européenne. Cette dernière comprend les apports des services nationaux d'observations volcanologiques et géomagnétiques, portés par les Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU), des organismes de recherche engagés dans la construction de services EPOS hors périmètre de l'IR, des moyens expérimentaux nationaux coordonnés au sein du réseau REGEF, de DATA TERRA pour ce qui concerne l'apport de l'observation par satellite et le co-hébergement, par le BRGM, du cœur de l'infrastructure européenne de EPOS

57. Réseau sismologique et géodésique français : https://www.resif.fr/?lang=fr

(ICS-C). EPOS regroupe ainsi un vaste ensemble d'observations, de moyens expérimentaux et de modélisation en lien avec les risques telluriques en Europe (sismologie, géomagnétisme, géodésie, données satellitaires, observatoires volcaniques, observatoires des failles, données et modélisations géologiques, réseaux de moyens expérimentaux).

• **L'IR EMSO-France**[58] est dédiée à l'observation du plancher océanique pour ce qui concerne la géosphère. Elle vient donc en transversalité entre les domaines « océan » (cf. § I.5) et « géosphère ». Elle s'appuie sur les moyens logistiques de la TGIR Flotte Océanographique Française (FOF).


© EMSO

Ces deux infrastructures sont soutenues par plusieurs initiatives financées dans le cadre du programme H2020, parmi lesquelles les projets VERCE (calcul intensif en sismologie), EURO-VOLC (mutualisation des infrastructures des observatoires volcaniques), SERA (mutualisation de moyens expérimentaux en sismologie) et EUROL (réseau de laboratoires souterrains). Des organismes français participent à l'ensemble de ces projets.

Ces moyens sont complétés, dans le domaine des aléas gravitaires, par ceux du Service d'Observation Multidisciplinaire des Instabilités de Versant (OMIV), labellisé Service National d'Observation par le CNRS.

Dans le domaine logistique (cf. § I.2), la Flotte Océanographique Française (FOF) et la station Concordia apportent également des moyens d'observation pour le domaine géosphère.

De manière plus marginale, une infrastructure telle qu'ILICO (cf. § I.5 et I.6), dans sa démarche intégrative dédiée à un milieu, apporte également des observations qui concernent la géosphère (mouvements du sol, érosion…).

Enfin, le domaine utilise les moyens nationaux d'analyse, que ce soient les sources de rayonnement synchrotron comme l'ESRF avec ses lignes spécialisées (cf. § I.2) ou les instruments nationaux du réseau RéGEF permettant une caractérisation fine des échantillons et des simulations au laboratoire des conditions extrêmes susceptibles de régner dans les milieux naturels.

De nombreuses observations dans le domaine de la géosphère sont, par ailleurs, diffusées dans le cadre de structures internationales, sans moyens propres, portées par les associations scientifiques[59] (INTERMAGNET pour les données des observatoires géomagnétiques, International GNSS Service pour les données GNSS[60], International Terrestrial Reference System Product Centre[61] et EUREF[62] pour les références géodésiques, Bureau Gravimétrique International-BGI[63] pour les données gravimétriques).

En plus de la normalisation internationale de l'identification des échantillons géologiques (initiative International Geo Sample Number – IGSN) et de celle des formats de données des géosciences (participation française à travers l'IUGS/CGI[64], en lien avec l'OGC), l'inter-opérabilité de l'ensemble des observations et la mise à disposition des données et des services restent un enjeu fort comme dans les autres domaines, porté nationalement par DATA TERRA (cf. § I.9) et par les initiatives ENVRI, ENVRIplus et ENVRIFair au niveau européen.

EN RÉSUMÉ

La contribution française aux infrastructures européennes du domaine de la géosphère s'appuie sur des réseaux d'observation de variables géophysiques (sismicité, pesanteur, magnétisme, mouvements…), des données d'observations géologiques, des laboratoires *in situ* (observatoires volcanologiques, failles instrumentées), des moyens logistiques d'accès aux sites (flotte, moyens de forages), des instruments de laboratoire (moyens analytiques) et des moyens de simulation et de calcul (e-infrastructures). Elle contribue à la compréhension des aléas telluriques et à la prévention des risques associés et aux enjeux concernant les réservoirs en sous-sol (ressources en eau, ressources minérales, stockage). À l'échelle nationale, la variété des observables, des moyens engagés, des objets étudiés et des organisations historiques conduisent à une structuration progressive de l'ensemble des contributions autour du noyau constitué par les infrastructures de la feuille de route nationale et notamment les IR RESIF-EPOS et EMSO-France.

58. European Multidisciplinary Seafloor and water column Observatory - http://www.emso-fr.org/EMSO-France.

59. Sites web INTERMAGNET pour les données des observatoires géomagnétiques (https://www.intermagnet.org/), IGS pour les données GNSS (http://www.igs.org/), ITRF et EUREF pour les références géodésiques (http://itrf.ign.fr/general.php), BGI (http://bgi.obs-mip.fr/fr).

60. Service de l'association internationale de géodésie (AIG).

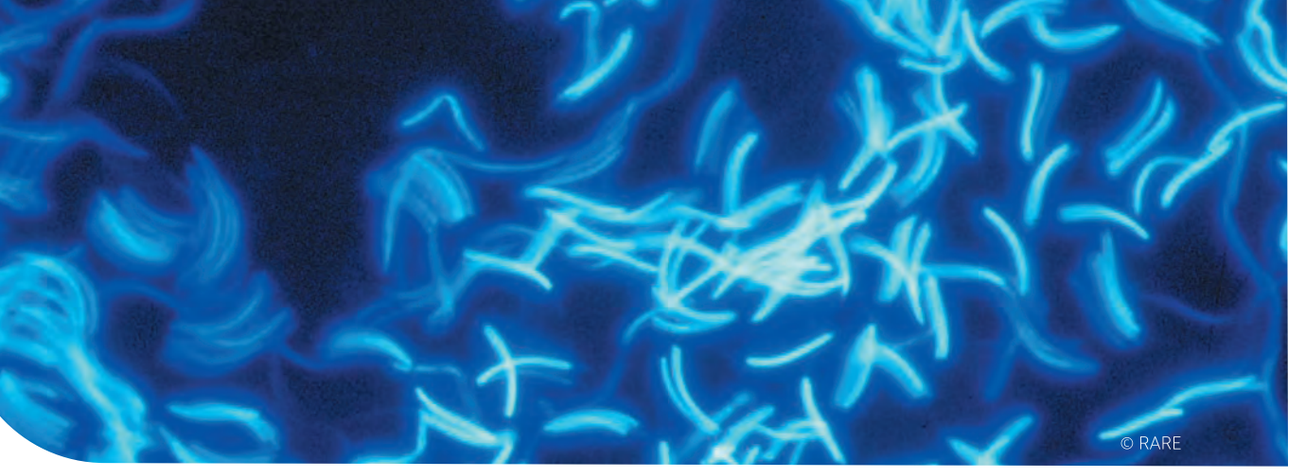
61. Composante du Service international de la rotation de la Terre et des repères de référence (IERS), lui-même service de l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI).

62. Sous-commission de l'association internationale de géodésie, responsable de la publication du repère de référence européen EUREF.

63. Service de l'association internationale de géodésie (AIG).

64. IUGS-CGI : Commission on Geoscience Information, http://www.cgi-iugs.org/

Les infrastructures de recherche du domaine des sciences du système Terre et de l'environnement en France et en Europe



8/ PÔLES DE DONNÉES

Un effort important a été consacré ces 10 dernières années, en France, au développement de systèmes d'information et d'accès aux données issues des infrastructures de recherche d'observation et d'expérimentation.

Des systèmes supportant l'acquisition, le contrôle, la certification et la diffusion des informations recueillies ont souvent été mis en place par type d'instruments et par grands compartiments. De même, au niveau européen, cette approche sectorielle où les systèmes d'information sont liés aux systèmes d'observation est encore assez largement répandue. Toutefois, l'Union Européenne développe un European Open Science Cloud (EOSC[65]), programme visant à fédérer les infrastructures de données scientifiques de toutes disciplines, qu'elles soient nationales ou européennes (ESFRI), de façon à permettre le développement d'une science des données et à accélérer l'innovation. Malgré tout, l'articulation entre les systèmes d'information et les pôles de données varie selon les besoins et les communautés. Par exemple, les infrastructures ESFRI comme ICOS ou EPOS sont chacune en charge de la chaîne complète des données, depuis l'acquisition de la mesure jusqu'à sa distribution par un portail de données et sa prise en compte dans des services avancés.

65. https://www.eosc-portal.eu/

Une certaine évolution vers des systèmes plus intégrés est en cours. Citons l'Infrastructure pan-européenne SeaDataNet[66] qui fédère actuellement les données d'observation marine *in situ* avec plus de 100 centres aux thématiques variées, interconnectés et partageant les mêmes protocoles de gestion ; l'ESFRI EPOS pour les données de la Terre Solide ; et, plus récemment, le cluster d'IR ENVRI (projet ENVRI-Fair) qui s'attache à harmoniser la gestion des données d'observation *in situ* de l'ensemble des compartiments environnementaux terrestres.

La construction française est originale dans le contexte européen où deux grands pôles nationaux de données environnementales ont été mis en place ces dernières années :

- DATA TERRA, le Pôle national de données et services du système Terre.
- PNDB, le Pôle national de données de Biodiversité.

Ces infrastructures s'inscrivent dans l'approche FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable) qui se développe en Europe.

66. Pan-European infrastructure for ocean & marine data management - https://www.seadatanet.org/

L'infrastructure de recherche DATA TERRA (Pôle de données et services du système Terre[67]), inscrite comme « projet » sur la feuille de route 2018, fédère les données de 4 grands compartiments :

- Atmosphère (AERIS)
- Océan (ODATIS)
- Surfaces continentales (Theia)
- Terre solide (ForM@Ter)

• **DATA TERRA** propose à l'ensemble de la communauté scientifique, aux acteurs publics et de la société civile, un accès unique à des bases de données obtenues *in situ*, par télédétection ou aéroportées, à des séries temporelles, à des cartographies thématiques, à des données et à des indicateurs spatialisés ainsi qu'à des outils, plateformes d'acquisition et traitements, matériels et équipements spécialisés et à des logiciels. Des séminaires, des ateliers ainsi que des formations sont régulièrement organisés pour favoriser l'usage de ces ressources en fonction des besoins diversifiés des communautés scientifiques, des acteurs publics et socio-économiques.

Cette infrastructure développe également des activités et services transversaux, à valeur ajoutée, telles que :

- Le dispositif DINAMIS (Dispositif INstitutionnel d'Approvisionnement Mutualisé en Imagerie Spatiale) qui vise à centraliser l'accès aux images à haute et très haute résolution spatiale pour de nombreux utilisateurs en France hors activités commerciales.

- Différentes structures (Centres d'Expertise Scientifique [CES], Centres de Données et de Services [CDS], Consortium d'Expertise scientifique…) développant des méthodes innovantes de gestion et/ou traitement des données (satellitaires, *in situ*) pour les rendre plus directement utilisables par les non spécialistes.

En 2020, les pôles de données constitutifs de DATA TERRA sont encore, pour certains d'entre eux, en phase de développement. Il est donc naturel que tous les types de données n'y soient pas encore référencés. On peut en particulier citer dans le domaine de la géosphère, le besoin de mieux référencer les prélèvements géologiques (carottes, roches) et les analyses géochimiques obtenus sur échantillons naturels. Le développement du portail de la cyber-carothèque nationale réalisé dans le cadre de l'EQUIPEX Climcor (cf. § I.3) est un premier pas dans cette direction.

Au niveau européen, DATA TERRA participe au programme EOSC-pillar pour la préfiguration de l'EOSC.

67. www.data-terra.org

• **Le Pôle national de données de Biodiversité (PNDB[68])** est une infrastructure de recherche inscrite sur la feuille de route nationale 2018, dont la mission est de renforcer la complémentarité et les synergies avec les différents acteurs du domaine (Système d'Information sur la Nature et les Paysages-SINP ; Inventaire National du Patrimoine Naturel-INPN ; Global Biodiversity Information Facility-GBIF ; Unité Mixte de Service MNHN-Office Français de la Biodiversité-CNRS Patrimoine Naturel-PatriNat). Elle a pour vocation d'assurer le pilotage de l'accès aux données de biodiversité, leur valorisation au service de la recherche et de l'expertise, ainsi que leur accessibilité au profit d'un large public d'acteurs académiques et non académiques.
L'objectif du PNDB est de faire progresser la consolidation des connaissances pour améliorer la compréhension de l'état et de la dynamique de la biodiversité. Il s'inscrit dans des enjeux environnementaux (changements globaux), socio-économiques (devenir des services écosystémiques) et de développement durable (soutenabilité des territoires).

Le PNDB, par son positionnement institutionnel, a également pour mission de veiller au maintien de la cohérence et de la synergie avec des systèmes d'information à destination de l'expertise et de l'appui aux politiques publiques, tels que les différents systèmes d'information portés par l'Office Français de la Biodiversité (OFB).
Le PNBD et DATA TERRA ont engagé des actions inter-pôles concernant le catalogage, les formats de données, les digital object identifiers (DOI) et l'authentification des données et métadonnées. Ils collaborent aussi dans le cadre de leurs participations aux initiatives européennes et internationales telles que RDA-Europe[69], DataONE, GEOBON[70], ENVRIplus, ENVRI-FAIR, EOSC, concernant les architectures d'accès distant, les métadonnées, le web sémantique ou l'interopérabilité. Concernant l'interopérabilité, par exemple, sous les auspices de la Commission européenne, JERICO-RI, EMSO, AtlantOS et ENVRIplus participent ensemble à un effort international. Ce dernier vise à harmoniser les bonnes pratiques et à faire progresser les technologies d'interopérabilité permettant le partage d'instruments, de techniques de mesure et de pratiques d'exploitation des données, en organisant des workshops conjoints pour une connaissance intégrée du système Terre.

© PNDB

68. http://www.patrinat.fr/fr/pole-national-de-donnees-de-biodiversite-pndb-6256

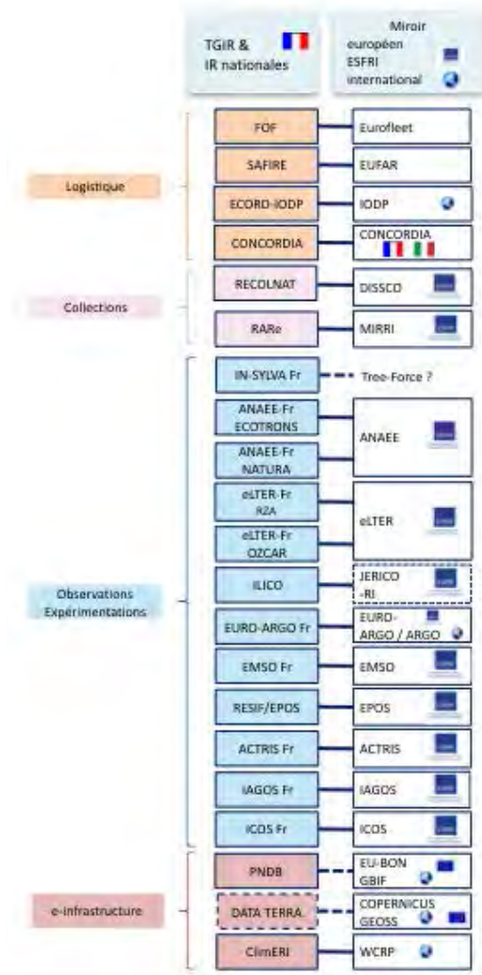
69. Research Data Alliance : https://www.rd-alliance.org/

70. The Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network : https://geobon.org/

9/ SCHÉMA D'ORGANISATION DES INFRASTRUCTURES DANS LE CONTEXTE NATIONAL ET EUROPÉEN

En guise de résumé, la Figure 3 fournit une représentation synthétique des liens entre les pôles de données (PNDB, DATA TERRA), les infrastructures d'acquisition de données françaises et leurs composantes européennes, qu'elles soient inscrites sur la feuille de route ESFRI ou qu'elles soient des projets financés dans le cadre d'Horizon 2020. Concernant les infrastructures européennes, les dispositifs sont intégrés au cluster ENVRIplus.

FIGURE 3 ILLUSTRATION PRÉSENTANT LE LIEN ENTRE LES INFRASTRUCTURES DE RECHERCHE INSCRITES SUR LA FEUILLE DE ROUTE NATIONALE (HORS ORGANISATION INTERNATIONALE) ET LEURS MIROIRS EUROPEENS (DONT ESFRI) OU INTERNATIONAUX.



2. Positionnement des infrastructures pour répondre aux grands enjeux scientifiques et sociétaux

Les infrastructures de recherche résultent avant tout d'une construction par les communautés scientifiques et sont donc organisées, le plus souvent, par grands domaines. Elles sont définies pour répondre à des questions scientifiques et/ou des demandes de services, et impliquent des développements et des innovations technologiques. Pour autant, un certain nombre d'infrastructures sont articulées entre elles et/ou permettent d'aborder des études transversales, interdisciplinaires, dans des milieux divers, depuis les processus physico-chimiques (météorologie, climat, cycles des éléments, etc.) jusqu'au fonctionnement des systèmes. D'autres sont, par nature, transversales aux milieux car elles se consacrent à un phénomène global, comme par exemple le cycle du carbone.

Les infrastructures de recherche en sciences du système Terre et de l'environnement sont une des pierres angulaires pour répondre aux grands enjeux scientifiques que posent les ODD de l'ONU à l'horizon 2030 ou à ceux de la décennie des Nations Unies pour les sciences océaniques au service du développement durable (2021-2030). Elles apportent des instruments indispensables pour réaliser des observations et acquérir des données sur les processus et les modéliser. Parmi ces grands enjeux, l'alliance AllEnvi s'est positionnée, dès sa création en 2010, sur le climat, l'eau, les territoires et l'alimentation puis sur la biodiversité, les ressources, l'océan et les risques. En 2017, le nouveau plan d'action d'AllEnvi a fait émerger 6 Grands Enjeux Transversaux (GET) d'intérêt pour les membres de l'alliance, en phase avec les préoccupations environnementales globales telles qu'identifiées au travers des ODD, du

programme Future Earth, du Belmont Forum, du GIEC ou de l'IPBES :

- Biodiversité.
- Adaptation et atténuation face au changement climatique.
- Transitions alimentaire, énergétique et écologique : durabilité des ressources.
- Territoires en transition.
- Risques naturels et environnementaux.
- Villes durables.

Dans ce document, ces enjeux environnementaux sont considérés dans leur généralité, dans un périmètre plus large que celui des seuls GET d'AllEnvi. Le Tableau 3 présente la répartition des infrastructures de recherche inscrites sur la feuille de route nationale en fonction de 7 enjeux environnementaux.

TABLEAU 3 RÉPARTITION DES INFRASTRUCTURES DE RECHERCHE INSCRITES SUR LA FEUILLE DE ROUTE NATIONALE EN FONCTION DE 7 ENJEUX TRANSVERSAUX ENVIRONNEMENTAUX PRINCIPAUX.

	Enjeux environnementaux						
NOM	Biodiversité	Climat	Alimentation	Ressources	Territoires	Risques	Ville
CEPMMT		●				●	
Concordia	(●)	(●)				(●)	
ECORD/IODP	●	●		●		●	
EURO-ARGO		●	●				
FOF	(●)	(●)	(●)	(●)		(●)	
ICOS-FRANCE		●					●
ACTRIS-FRANCE		●					●
AnaEE-FRANCE ÉCOTRONS	●	(●)					
AnaEE-FRANCE NATURA	●	●		(●)			
CLIMERI-FRANCE		●				●	
eLTER-FRANCE OZCAR	(●)	(●)		●	●	●	(●)
eLTER-FRANCE RZA	●	(●)	(●)	●	●	●	●
EMBRC-FRANCE	●			●			
EMPHASIS-FRANCE	(●)		●				
EMSO-FRANCE	●	●		●		●	
IAGOS-FRANCE		●					
IBISBA-Fr			(●)	(●)			
ILICO	●	●			●	●	
In-Sylva	●			●	(●)		
PNDB	●			●			
RARe	●		●	●			
RECOLNAT	●			●			
RESIF/EPOS				(●)	●	●	
SAFIRE		●			(●)	(●)	(●)
DATA TERRA		●		●	●	●	●

1/ BIODIVERSITÉ

La biodiversité (c'est-à-dire la diversité du monde vivant à différents niveaux d'organisation, des gènes aux écosystèmes) subit des altérations croissantes provoquées par le changement climatique et diverses pressions d'origine anthropique[71]. Tant sur les continents que dans les océans, les activités humaines, notamment du fait de la démographie humaine et de besoins alimentaires grandissants, sont à l'origine d'une exploitation toujours plus intense des ressources naturelles, d'une artificialisation des sols (changements d'usages, imperméabilisation…) et d'une intensification de la pollution de tous les compartiments de la biosphère. A cela s'ajoutent les effets négatifs des invasions biologiques favorisées par la mondialisation des échanges et le changement climatique. Des espèces/populations aux écosystèmes – terrestres, marins, dulçaquicoles – en passant par les communautés, c'est l'ensemble du monde vivant qui est impacté et, consécutivement, c'est une multitude de services écosystémiques, dont bénéficie l'humanité, qui sont altérés, sans que l'on soit en mesure aujourd'hui d'estimer toutes les conséquences sociales et économiques.
Ces services écosystémiques sont devenus une préoccupation des politiques publiques et un enjeu économique. Il ne fait plus aucun doute que les changements globaux qui affectent lourdement la biodiversité, et donc les productions agricoles, les ressources halieutiques… auront des conséquences majeures en termes d'alimentation[72], de santé et dans d'autres domaines.

La recherche française contribue de manière significative à l'accroissement des connaissances sur l'état de la biodiversité, sur la compréhension de ses dynamiques et son devenir, ainsi que sur l'évolution des services dont l'Homme bénéficie, que ce soit au niveau national ou ailleurs sur la planète.
L'enjeu scientifique principal pour l'étude de la biodiversité repose sur la complémentarité des données pour :

- mieux connaitre la biodiversité terrestre et marine ;
- mieux comprendre l'état et les dynamiques de la biodiversité en interaction avec le fonctionnement des écosystèmes et les sociétés humaines ainsi que leurs déterminants ;
- modéliser et proposer des scénarios en lien avec le changement global ;
- développer son utilisation durable (telle que définie par l'UICN) et ses contributions aux socio-écosystèmes.

Ces enjeux de la biodiversité bénéficient d'importants relais nationaux, européens et internationaux.

La recherche dans le domaine de l'écologie permet notamment d'apporter un appui à la décision publique et privé et de contribuer à l'élaboration de solutions aux grands défis environnementaux.

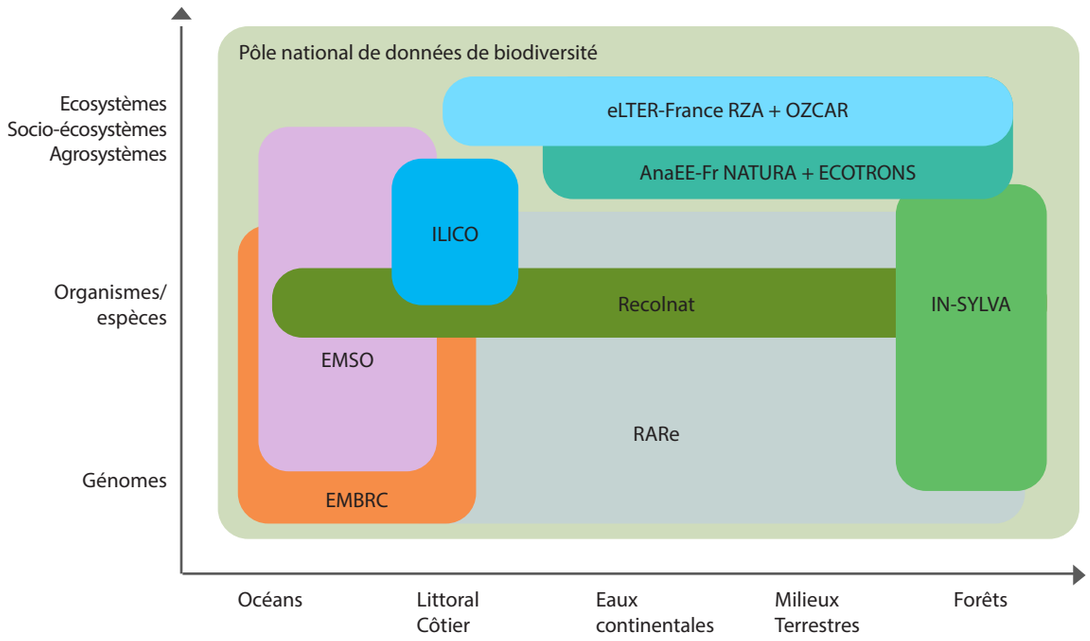
71. Pour plus de détails, voir le rapport de l'IPBES (2019). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES secretariat, Bonn, Germany, 45 pp. https://www.ipbes.net/global-assessment-report-biodiversity-ecosystem-services

72. Le terme biodiversité agricole a un sens large qui inclut toutes les composantes de la diversité biologique pertinentes pour l'alimentation et l'agriculture, et toutes les composantes de la diversité biologique qui constituent les écosystèmes agricoles, également appelés agro-écosystèmes : la variété et la variabilité des animaux, des plantes et des micro-organismes, au niveau génétique, de l'espèce et de l'écosystème, qui sont nécessaires pour le maintien des fonctions clés d'un agro-écosystème, de sa structure et de ses processus (COP 5 Convention on biological diversity, decision V/5, appendix).

Réponse du dispositif à l'enjeu

Les infrastructures de recherche en environnement ont, à plusieurs titres, un rôle particulier à jouer dans la caractérisation et le suivi de la biodiversité, notamment en réponse aux changements. La thématique de la biodiversité est transversale à de nombreuses infrastructures en réponse aux changements globaux et concerne tous les milieux, littoraux et côtiers (ILICO, EMBRC-France), marins (EMBRC-France, EMSO-France) et continentaux (eLTER-France RZA) et AnaEE-France NATURA et ÉCOTRONS) (Figure 4). La biodiversité est étudiée de manière descriptive ou fonctionnelle, par une diversité d'approches, allant de l'observation naturaliste des écosystèmes à l'imagerie haute résolution et à la génomique, dans leurs déclinaisons technologiques les plus diverses. Le PNDB assure l'accès aux données de biodiversité ainsi que leur valorisation.

FIGURE 4 PAYSAGE DES INFRASTRUCTURES DE RECHERCHE FRANÇAISES DANS LE DOMAINE DE LA BIODIVERSITÉ ET DES ÉCOSYSTÈMES. L'ENCADRÉ ORANGE INDIQUE UNE INFRASTRUCTURE COMMUNE AVEC LE DOMAINE BIOLOGIE-SANTÉ.



En milieu polaire, la France contribue au suivi à long terme de la biodiversité dans le contexte particulier des îles subantarctiques, depuis plusieurs décennies, et fournit des données uniques au monde (zone atelier antarctique et sub-antarctique – ZATA, intégrée à eLTER-France RZA). et internationales.

À ces observations ou expérimentations *in situ*, s'ajoutent les infrastructures de collections comme RECOLNAT ou de ressources biologiques d'organismes vivants comme RARe, qui conservent des échantillons prélevés dans les milieux naturels ou dans des dispositifs expérimentaux. Toutefois, les inventaires de terrain se poursuivent et la caractérisation de la dynamique de la biodiversité est une tâche de très longue haleine et la description de taxons nouveaux conservés en collections également. Un effort important dans ces domaines doit être poursuivi, voire amplifié[73].

La biodiversité est souvent assimilée à un objet d'étude ou à la composante d'un système et, plus récemment comme une opportunité pour un usage à vocation socio-économique. Considérer la biodiversité dans son usage au service de l'alimentation, de la préservation de la qualité de vie et de la santé des citoyens, des services écosystémiques et dans la valorisation industrielle et économique, mais aussi au service de l'atténuation et de l'adaptation face au changement climatique est incontournable. Des dispositifs conséquents de recherche, qui ne sont pas encore dans des infrastructures de recherche nationales bien que supports de nombreux observatoires, traitent de l'agroécologie, du bio-contrôle, de l'étude des holobiontes[74], de solutions fondées sur la nature ou d'innovations technologiques bioinspirées, dont la biodiversité est une composante majeure.

Des avancées technologiques majeures sont en cours sur les questions de technologie d'imagerie, de couplage entre données génomiques, fonctionnelles et phénotypiques, ainsi que d'inventaire taxonomique, plus ou moins fin, à haut débit des organismes présents dans les échantillons environnementaux (ADN environnemental, metabarcoding). De nouvelles compétences émergent, dans des domaines très interdisciplinaires associant biologie, physique, mathématiques et bio-informatique, pour une meilleure compréhension des interactions complexes entre le vivant et l'environnement.

Les infrastructures françaises de recherche, notamment le PNDB, doivent permettre à la France de contribuer, au meilleur niveau, aux réponses sur les enjeux sur la biodiversité, aussi bien scientifiquement que politiquement : GIEC, IPBES, UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature; Agenda 2030 pour le Développement Durable, Décennie des Océans, Conventions des Nations Unies (notamment CDB post 2020), Expertises nationales (avec notamment l'Évaluation Française des Écosystème et Services Ecosystémiques - EFESE), etc.

73. Ce qui implique aussi que les établissements conservent, voire renforcent, leur vivier de compétences en taxonomie et en systématique.

74. Un holobionte est l'ensemble composé par un organisme, animal ou végétal, et les micro-organismes qu'il héberge en son sein ou à l'interface avec son environnement.

Manques

Les disciplines scientifiques touchant à la biodiversité se heurtent encore régulièrement aux lacunes dans la caractérisation des espèces vivantes : le « handicap taxonomique », identifié comme tel dès le lancement de la convention sur la diversité biologique (1992), concerne de larges pans du monde vivant (seulement 1/10e des espèces d'insectes et de champignons seraient formellement décrits ; seulement 240 000 espèces marines ont été décrites alors que les scientifiques estiment leur nombre entre 500 000 et plus de 10 millions, sans compter le monde microbien), certains environnements (océan profond, sol…) et des régions entières, en particulier dans le monde tropical, extrêmement riche en espèces. L'inventaire des taxons, leur description, l'analyse de leur distribution géographique et leur classification, pivots conceptuels de toute étude solide sur la biodiversité, ne sont pas terminés. La France, avec en particulier ses territoires tropicaux ultra-marins, devrait être leader dans l'acquisition des connaissances sur cette biodiversité extraordinaire pour laquelle elle a une responsabilité particulière.

L'effort important et les atouts de la France en matière d'infrastructures se consacrant pour partie ou en totalité à la biodiversité apparaissent insuffisamment connus des communautés académiques et des décideurs publics ou économiques : elles nécessiteraient probablement une action de communication transversale spécifique.

Des améliorations significatives peuvent être espérées dans :

- le développement de la caractérisation de la biodiversité dans les infrastructures environnementales (milieux observés, types de mesures, diversité de l'échantillonnage, technologie de caractérisation) ;
- l'implémentation du PNDB, qui est encore très récent, et de ses services, en cohérence avec DATA TERRA ;
- le développement d'infrastructures participatives (PNDB-Tempo[75]) ;
- la reconnaissance d'infrastructures permettant les recherches sur l'usage de la biodiversité pour des innovations dans l'utilisation durable des services écosystémiques, par exemple en agriculture (e.g., agroécologie), en santé ou en soutien à d'autres activités socio-économiques ;
- une meilleure coordination entre l'ensemble des acteurs publics pour la définition des protocoles de mesures, la conservation des échantillons et l'usage des données.

EN RÉSUMÉ

Implantées sur tout le territoire national et aussi dans de nombreux territoires outre-mer, subpolaires et polaires, d'espaces intertropicaux et des pays du Sud, les infrastructures françaises sont largement distribuées spatialement, ce qui donne ainsi à la France un rôle privilégié concernant l'étude de la biodiversité dans tous les milieux (marins, côtiers et continentaux).

75. https://www6.inra.fr/soere-tempo

2/ CLIMAT

Le climat rassemble une combinaison de facteurs atmosphériques moyens tels que température et humidité de l'air, pression atmosphérique, vents, insolation, précipitations, qui interagissent entre eux, à travers des grands cycles. La modélisation du climat global dépend fortement du flux d'énergie et de matières entre l'atmosphère et les surfaces océaniques et continentales. La mesure de la température autour du globe est, par exemple, une donnée clé retenue pour mesurer l'ampleur et les conséquences du changement climatique.

Le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) a établi que les augmentations des concentrations atmosphériques des GES, bien entendu le CO_2 mais aussi le CH_4 et le N_2O, sont responsables du réchauffement progressif de la planète avec des conséquences multiples : acidification des océans, dépérissement des récifs coralliens, fonte de la cryosphère, élévation du niveau de la mer, augmentation de la fréquence d'événements extrêmes, etc. Au-delà des GES, la qualité de l'air, avec des gaz comme l'ozone, les NO_X, le SO_2 ou des particules fines pour la plupart associés aux activités humaines, est un véritable enjeu de santé publique. Son étude est étroitement associée à la modélisation météorologique et climatique.

Le changement climatique concerne aussi les précipitations, dont les trajectoires d'évolution au niveau global et sur les territoires nationaux sont complexes à appréhender. Les conséquences du changement climatique sur le cycle de l'eau sont nombreuses, avec des répercussions sur les ressources en eau, la production alimentaire, l'enneigement, les crues et les étiages des cours d'eau, les cyclones et tempêtes, etc.

Les principaux verrous de la recherche climatique concernent deux approches complémentaires et leur intersection avec, d'une part, l'observation et l'acquisition de données, et d'autre part la conceptualisation et la modélisation. Ceci permet d'aboutir à une attribution plus précise des changements climatiques et de leurs impacts ainsi qu'à des propositions de scénarii, trajectoires et recommandations pour l'atténuation et l'adaptation. Chacune de ces approches comporte ses propres verrous et elles doivent être mises en œuvre dans une démarche systémique, allant des sciences du climat aux sciences naturelles et aux sciences sociales et politiques. La modélisation du climat est aussi indispensable pour comprendre le fonctionnement de sa dynamique et mettre en perspective le changement climatique en cours avec les variations passées du climat.

Réponse du dispositif à l'enjeu

Les infrastructures des domaines atmosphérique, hydrosphère, écosystèmes et océan concourent

aux travaux menés dans le cadre du GIEC, et sont aussi à mettre en regard de l'accord de Paris[76] de décembre 2015 sur le climat en tant qu'instruments permettant de suivre le cycle du carbone (dont les émissions de CO_2 et de CH_4), l'évolution des bilans (puits/source de carbone), le cycle de l'eau et la résilience des écosystèmes. Elles permettent aussi le suivi des autres gaz atmosphériques et des aérosols. La quantification des flux d'échanges et l'étude des processus qui contrôlent l'eau, les gaz et particules atmosphériques nécessitent à la fois des données d'observation, des approches numériques, d'analyses statistiques des données et de modélisation.

Les données produites par les infrastructures de recherches européennes, géographiquement centrées sur l'Europe, doivent s'insérer dans le contexte international. Ainsi les réseaux ICOS-France (GES pour les domaines atmosphériques, océaniques et écosystèmes), IAGOS-France (gaz traces réactifs, GES ou aérosols et particules nuageuses), ACTRIS-France (espèces atmosphériques à temps de vie court) et EURO-ARGO France (données océaniques) sont des miroirs d'infrastructures européennes (ICOS, IAGOS, ACTRIS, EURO-ARGO), ce qui positionne la France très favorablement parmi les pays disposant de réseaux de données sur l'atmosphère jusqu'au domaine océanique, même si d'autres pays occupent une position comparable (Allemagne, Italie, ...). Elles s'inscrivent dans le cadre du Global Atmospheric Watch[77]. Concernant les puits de carbone dans les écosystèmes terrestres, ICOS-écosystèmes est un des leaders de l'effort international Fluxnet[78]. L'interopérabilité de ces réseaux comme la coordination internationale de la métrologie sont fondamentales, et doivent exploiter les efforts internationaux de standardisation notamment à travers l'Open Geospatial Consortium (qui traite de l'interopérabilité des observations et des données localisées dans l'espace et dans le temps) de l'initiative GEO[79]/ GEOSS[80] (*Group on Earth Observation/Global Earth Observation System of Systems*) ou encore des travaux des agences de métrologie, elles-mêmes coordonnées autour du Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). Les données produites dans CLIMERI-France s'insèrent dans la base de données internationale Earth System Grid Federation des simulations de référence du WCRP.

La recherche sur le climat requiert une capacité de plus en plus importante à exploiter en synergie de longues séries d'observations et des outils de modélisation numérique. Si ces outils, capables de simuler un nombre croissant de compartiments du système Terre (atmosphère, océans, sols, végétation, cryosphère…) et les cycles fondamentaux au sein et entre ces compartiments (énergie, eau, carbone…), sont incontournables pour produire des scénarios d'évolution du climat futur sous différentes hypothèses d'émissions de GES, leur confrontation à de longues séries d'observations est indispensable afin d'évaluer leur capacité à reproduire l'évolution passée du climat, d'ajuster l'ensemble de toutes les paramétrisations physiques sur lesquels ils reposent, et d'estimer leurs erreurs systématiques. Par ailleurs, l'assimilation de longues séries d'observations dans ces modèles permet de produire des ré-analyses, qui donnent accès à une reconstitution cohérente de

76. Le 12 décembre 2015, la COP21 s'est conclue sur un premier accord qui prévoit de limiter l'augmentation de la température à 2°C d'ici la fin du siècle, voire d'aller vers un objectif de +1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle.

77. GAW est un programme de l'Organisation météorologique mondiale qui vise à harmoniser un réseau de mesure international de l'atmosphère de fond.

78. Fluxnet est un réseau international de partage de données et d'harmonisation des mesures sur des sites de tour à flux pour les écosystèmes terrestres.

79. GEO rassemble les agences internationales et gouvernements au niveau ministériel pour coordonner les efforts en observations de la Terre.

80. GEOSS est un concept porté par GEO d'intégration à grande échelle de tous les systèmes d'observation de la Terre, et inclut la gestion des données.

l'ensemble des variables d'état de ces différents compartiments et de leur évolution passée, ainsi que des incertitudes associées.

Ce besoin impose donc un rapprochement et une interopérabilité accrus entre les infrastructures de recherche en charge des observations (atmosphériques, océanographiques, terrestres) et des données associées (DATA TERRA) ainsi que celles en charge de la production et de la mise à disposition des simulations climatiques (CLIMERI-France). En termes d'infrastructures numériques, ce besoin doit également conduire à développer des moyens de calcul importants au plus près des larges volumes de données, les volumes en jeu rendant de plus en plus difficile le transfert de ces données entre des sites distants.

Les questions des impacts du changement climatique et de l'adaptation imposent de travailler à des échelles spatiales nettement plus fines que celles de la plupart des modèles climatiques globaux et régionaux actuels. Pour cela, le développement de méthodes robustes et fiables de descente d'échelle et de modèles d'impacts est un prérequis pour valoriser les simulations du climat futur qu'ils produisent. Afin de les calibrer et de les valider, il est nécessaire de disposer de longues séries d'observations cohérentes des variables physiques et biophysiques locales, prenant également en compte les activités humaines (irrigation, agriculture, urbanisation, activités en mer…). Il est ainsi capital que les sites d'observation associés soient opérationnels sur la durée de façon à pouvoir disposer de séries de données sur le long terme, idéalement plusieurs décennies, en métropole comme en outre-mer. Les américains ont été les premiers à le comprendre pour les GES. Ainsi la mesure du CO_2 à Mauna Loa (Observatoire à Hawaï) a démarré en 1957 et a donné la courbe emblématique (« courbe de Keeling ») de l'augmentation du CO^2 dans l'atmosphère terrestre. Les premières mesures françaises du CO_2 à l'Ile Amsterdam, dans l'Océan Indien, ont démarré en 1981 et constituent la 2ème série temporelle la plus longue au niveau mondial. La structuration en cours des services d'observation préexistants en infrastructures de recherche doit s'inscrire dans une stratégie de pérennisation des séries temporelles d'importance capitale pour l'étude du climat. Les données des simulations de référence de CLIMERI-France s'inscrivent également dans la durée et sont analysées par diverses communautés pendant une dizaine d'années ou plus après leur réalisation, nécessitant une stratégie internationale d'archivage long-terme.

Grâce à l'appui des infrastructures de recherche, de production et de mise à disposition de données (Data Terra, Copernicus, DIAS, Geoportail, plateformes SIG existantes…) ainsi que sur les services opérationnels (Copernicus etc.), l'initiative SCO[81] (Space Climate Observatory) permet de proposer, à l'échelle locale, des outils d'aide à la décision en observant, en évaluant et en anticipant les impacts du changement climatique, à l'aide de données satellite, de données *in situ* et de données socio-économiques locales.

Manques

La Figure 5 donne la vision européenne de ces outils pour le domaine atmosphère en tant que lieu du forçage radiatif à l'origine du changement climatique, et en illustre la complémentarité.

Dans ce paysage, on peut noter l'absence de la France sur la thématique de la dynamique de la haute atmosphère (neutre ou ionisée) au niveau européen (cf. infrastructure EISCAT-3D), alors que le projet de Design Study ARISE[82] coordonné par la France sur cette même thématique s'est

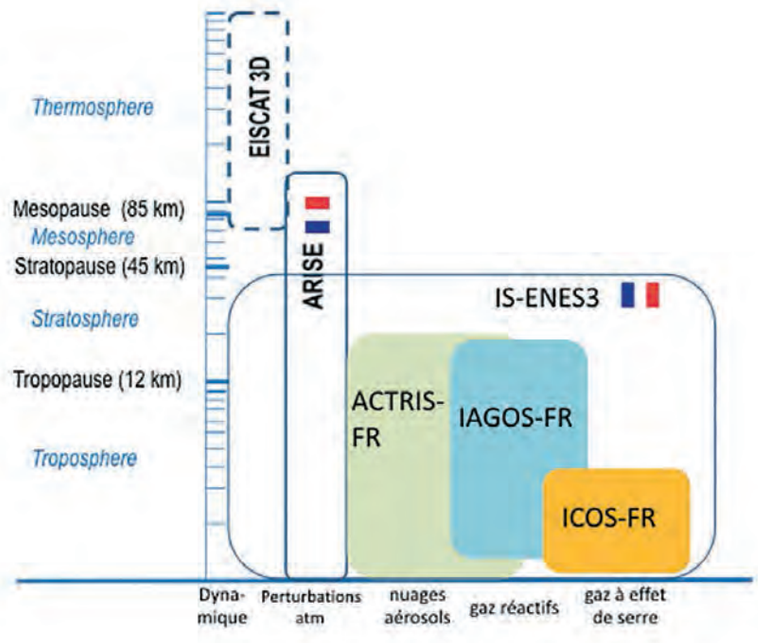
81. https://www.spaceclimateobservatory.org/

82. ARISE = Atmospheric dynamics Research InfraStructure in Europe (Design Study FP7/H2020 2012-2018).

terminé en 2018. La communauté scientifique prépare, en liaison avec des organismes internationaux comme l'organisation du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires (TICE), l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) et le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT, cf. § I.5) un projet d'Integrating Activity sur cette thématique pour poursuivre les avancées dans ce domaine : améliorer les modèles de climat et prévisions météorologiques à moyen terme, et développer de nouveaux services pour la sécurité civile.

Au-delà des sites d'observation actuels, il faudra aussi s'interroger sur la mise en place de nouveaux sites : des sites pour couvrir des régions sous-échantillonnées comme la Méditerranée, l'Outre-Mer[83] ou encore des sites en milieu urbain ou périurbain pour lesquels le suivi des émissions de GES et d'espèces réactives est un sujet d'actualité. La ville comme les sites

FIGURE 5 INFRASTRUCTURES DE RECHERCHE FRANÇAISES ET EUROPÉENNES DANS LE DOMAINE « ATMOSPHÈRE ». LES INFRASTRUCTURES AVEC UN FOND COLORÉ SONT CELLES FIGURANT SUR LA FDR NATIONALE. LES INFRASTRUCTURES À FOND BLANC ENCADRÉES DE BLEU SONT DES IR EUROPÉENNES (H2020) SANS OU AVEC PARTICIPATION FRANÇAISE (DRAPEAU FR).



83. Il y a une station ICOS et ACTRIS sur le site du piton Maïdo (Ile de la Réunion), une station ICOS Atmosphère en Guyane et une sur l'Ile d'Amsterdam (océan Indien).

industriels constituent des zones d'émissions intenses de GES et de composés réactifs. Ceci implique de réfléchir à des aspects instrumentaux (capteurs bas coût, sites mobiles sur voiture ou drone) et méthodologiques (nouveaux traceurs).

EN RÉSUMÉ

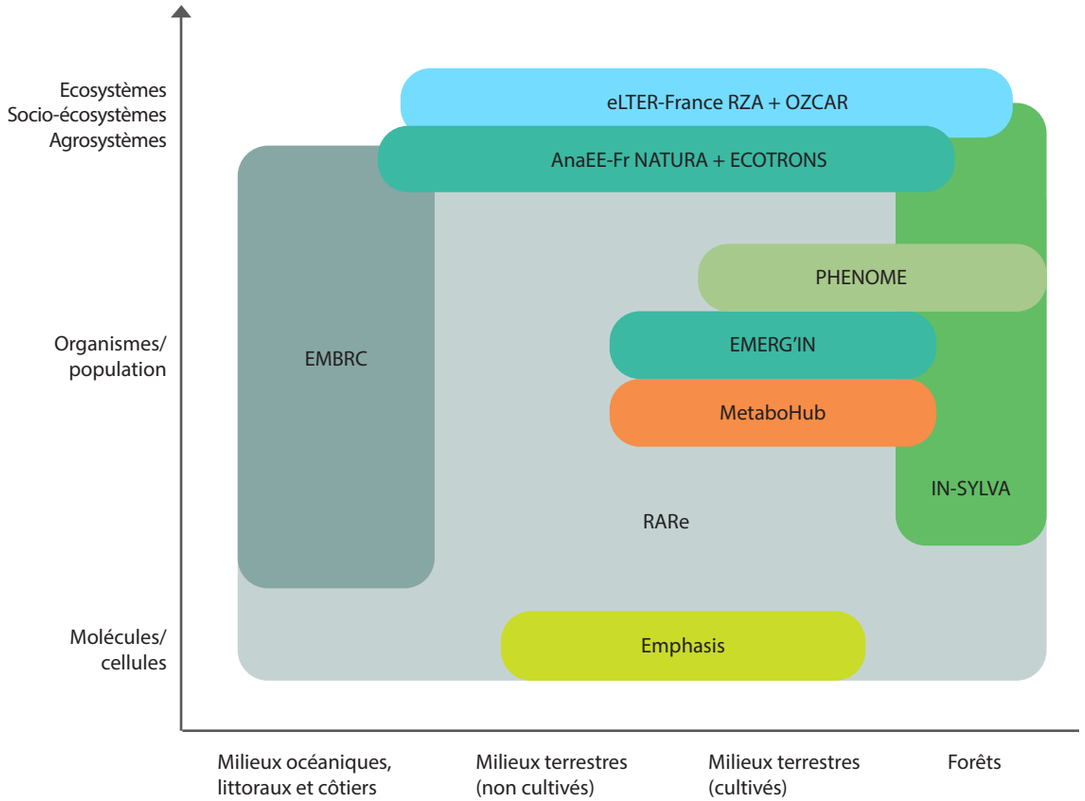
La France dispose ainsi d'un ensemble d'outils pour le domaine atmosphère (ACTRIS, CEPMMT, IAGOS, ICOS, CLIMERI-France, SAFIRE, DATA TERRA et les prochains satellites) et pour le domaine océanique (EURO-ARGO) qui lui permet d'avoir une approche intégrée allant des mesures, données, bases de données, aux services liés aux données, et aux simulations climatiques.

© RARE

3/ ALIMENTATION HUMAINE ET SANTÉ

Les termes de l'équation mondiale en matière de sécurités alimentaire et énergétique sont connus : la planète devra couvrir les besoins de plus de 9 milliards d'individus en 2050, dans un contexte de raréfaction des énergies fossiles, de tension sur la disponibilité des ressources énergétiques et naturelles (eaux, sols, ressources marines…), le tout sous les contraintes du changement climatique à maîtriser, d'une nécessité de restauration de la qualité des milieux (sol, eau, air) et de la préservation de la santé humaine, animale et végétale (concepts One Health/EcoHealth). Ces tensions auront un impact déterminant sur l'alimentation, celle-ci étant en effet très dépendante des ressources à la fois pour la production agricole et halieutique (pêche et aquaculture) et pour l'ensemble de la chaîne de valeur allant jusqu'aux consommateurs. Reconsidérer les systèmes alimentaires actuels en travaillant à des systèmes de production et de consommation plus économes en intrants, en énergie, en sol et en eau, avec moins d'impacts environnementaux (émissions de GES, pollutions diffuses, destruction des habitats – marins et terrestres – et érosion de la biodiversité…), mais en mesure de couvrir les besoins d'une population en croissance continue constitue un défi majeur qui nécessite une transition alimentaire à venir. Ce défi est posé dans un contexte de globalisation, d'urbanisation rapide et de changements de comportements des consommateurs, et cela à différents niveaux, depuis l'échelle mondiale et nationale jusqu'au niveau local (régions, villes). La transition alimentaire, requise par la contrainte démographique et la limitation des ressources naturelles, doit se faire en intégrant les défis posés par la sortie du modèle d'utilisation des ressources fossiles. Cela se traduit par une demande accrue faite à l'agriculture de fournir non seulement des aliments et des services écosystémiques, mais aussi de l'énergie, des matériaux et des molécules pour la chimie. De même cela pose la question de l'utilisation des espaces marins pour la production d'énergies renouvelables, la recherche de molécules pour la santé ou la pharmacologie, le développement des cultures de micro-algues pour la production de bio-carburants pour ne citer que quelques exemples. Ces transitions nécessitent la mise en œuvre de recherches sur un large panel de disciplines et de thématiques, parfois intégrées pour répondre aux enjeux de santé, environnementaux et économiques. Cela implique la construction d'infrastructures de recherche dans le domaine des sciences environnementales (par exemple pour l'analyse et la maîtrise des processus biologiques pour la production végétale ou animale durable), des sciences de la nutrition et médicales ou des sciences économiques et sociales (figure 6).

FIGURE 6 PAYSAGE DES INFRASTRUCTURES DE RECHERCHE FRANÇAISES DANS LE DOMAINE DE L'ALIMENTATION HUMAINE. L'ENCADRÉ ORANGE INDIQUE UNE INFRASTRUCTURE COMMUNE AVEC LE DOMAINE BIOLOGIE-SANTÉ. D'AUTRES INFRASTRUCTURES À L'INTERFACE AVEC LE DOMAINE BIOLOGIE-SANTÉ NE SONT PAS INDIQUÉES SUR LE SCHÉMA (VOIR LE TEXTE POUR PLUS DE DÉTAILS).



Réponse du dispositif à l'enjeu

Dans une acception large intégrant la composante production de la ressource, l'alimentation humaine est un domaine de recherche qui fait appel à une très grande diversité de technologies qui s'inscrivent parfois dans le domaine des sciences de l'environnement et du système Terre, mais aussi, souvent, dans d'autres domaines : biologie et sciences médicales, ingénierie (et sciences de la matière), sciences économiques et sociales. Certaines infrastructures, citées pour d'autres enjeux dans ce document, contribuent au domaine de l'alimentation, en particulier celles relevant de l'observation et de l'expérimentation longue durée dans les milieux agricoles et forestiers (AnaEE-France NATURA, In-Sylva-France), ou de la conservation, de la caractérisation et de l'usage de la biodiversité (RARe, RECOLNAT). Certaines infrastructures, identifiées notamment dans le domaine de la Biologie-Santé, au niveau national et européen,

aident aussi à répondre à l'enjeu de l'alimentation et, pour partie, de la santé en lien avec l'environnement : Phénome et Emphasis-France pour le phénotypage végétal, Emerg'In[84] et VetBioNet[85] pour l'infectiologie animale et les maladies émergentes de la faune domestique comme sauvage, IBISBA-France, miroir de IBISBA-EU, pour les biotechnologies blanches…). Outre les infrastructures génériques du domaine Biologie-Santé (France Génomique[86], l'Institut Français de Bio-Informatique[87], MetaboHub[88], France Life Imaging[89], France Bio-Imaging[90], la Plateforme nationale d'infrastructures de recherche clinique - F-CRIN[91] pour la recherche clinique…), certaines plateformes dédiées à l'alimentation sont présentes au sein du GIS IBISA[92], représentant ainsi un ensemble très significatif de ressources et services pour la caractérisation des aliments, des tissus humains, et des ressources biosourcées (biochimie structurale, analyse, imageries diverses, sensorialité, centres de ressources biologiques des consortia du microbiote intestinal humain etc.). Notons que les feuilles de route nationales d'autres pays ne classent pas le phénotypage, les ressources biologiques ou la nutrition humaine (de la caractérisation des ressources, de la bioéconomie, au phénotypage nutritionnel, à la consommation ou à l'économie du secteur agroalimentaire) dans le domaine de l'environnement, comme, par exemple, la feuille de route des infrastructures de recherche du Royaume-Uni[93].

Certaines infrastructures françaises présentant un intérêt dans le domaine de l'alimentation sont présentes sur la feuille de route ESFRI :

- ECRIN pour l'Europe et F-CRIN au niveau national pour le phénotypage nutritionnel des patients obèses.
- Emphasis pour l'Europe et Emphasis-France au niveau national.

La France est impliquée dans l'infrastructure européenne MetroFood[94], spécialisée dans la métrologie pour l'alimentation, à travers les participations de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (Pau), du laboratoire d'analyse chimique spécialisé dans l'analyse des métaux à l'état de traces et ultra-traces (ADERA/UT2A, Pau) et du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE).

Enfin, une large partie des dispositifs collectifs d'expérimentation dédiés à la recherche agronomique (grandes cultures, élevage, ligneux, forêt, expérimentation animale, milieux aquatiques), sur lesquels reposent parfois des observatoires de l'environnement et qui sont reconnus pour leur organisation ouverte de type plateforme, ne sont pas inscrits sur la feuille de route nationale. Ces dispositifs sont portés par plus de 40 entités avec environ 1 000 équivalents temps-plein et 8 000 ha de surface agricole utile. Ce sont les dispositifs les plus en interface entre les domaines de la biologie et ceux de l'environnement, car ils traitent le plus souvent des demandes d'expérimentations en lien avec

84. Emerg'In : infrastructure de recherche nationale dédiée à la lutte contre les maladies infectieuses animales émergentes ou zoonotiques par l'exploration in vivo (domaine Biologie-Santé).
85. VetBioNet : Projet européen H2020 pour renforcer la coopération et l'accessibilité de l'ensemble des plateformes d'infectiologie et mieux connaître les maladies animales (transmissibles à l'homme ou non), mieux les contrôler et prévenir leurs effets dévastateurs.
86. https://www.france-genomique.org/
87. https://www.france-bioinformatique.fr/
88. Métabo-Hub : Infrastructure de recherche nationale de métabolomique et de fluxomique dédiée à tous domaines (agronomie, santé, …)
89. https://www.francelifeimaging.fr/
90. https://france-bioimaging.org/
91. https://www.fcrin.org/
92. https://www.ibisa.net/ : Le Groupement d'intérêt scientifique [GIS] IBiSA (Infrastrutures en Biologie Sante et Agronomie) a été créé en mai 2007.
93. https://www.ukri.org/files/infrastructure/progress-report-final-march-2019-low-res-pdf/
94. https://www.metrofood.eu/

diverses innovations (notamment en relation avec le développement de l'agroécologie), et parce qu'ils sont le plus souvent déjà en interaction avec des infrastructures nationales (Phénome, Emphasis-France, AnaEE-France, eLTER-France, Emerg'In…). L'enjeu à moyen terme est de les faire reconnaître en tant que tels au niveau national et européen. Pour la plupart, ces dispositifs comportent ou sont en lien avec des composantes de type e-infrastructures pour la diffusion et le partage des données, qui contribuent parfois directement à DATA TERRA ou au PNDB. A terme, une e-infrastructure en agronomie et alimentation ayant pour vocation à rejoindre DATA TERRA et dont la préfiguration européenne est inscrite dans le volet Agro Food de EOSC (Food Nutrition Security Digital Commons) devrait voir le jour.

Manques

Depuis plusieurs années, l'ESFRI fait état de ses difficultés à identifier de réelles infrastructures dédiées à l'alimentation alors que c'est une demande récurrente de la Commission Européenne et des communautés scientifiques : plusieurs initiatives en particulier visant à intégrer les données de consommation, de caractérisation des aliments et de cohortes sont en cours de montage avec des difficultés liées à la protection des données (embargo des industriels, données privées, problèmes d'éthique…). En France, le domaine rencontre les mêmes contraintes, qui retardent l'émergence d'entités ouvertes, permettant de faire le lien par exemple entre les cohortes, la qualité des aliments, les consommations, les modèles économiques… Les infrastructures de ce type doivent en outre établir des liens particuliers avec les acteurs des politiques publiques mais aussi avec les acteurs socio-économiques, qui sont parfois également très présents dans l'innovation, ainsi qu'avec les structures internationales quand elles existent.

On peut considérer que l'ensemble des entités du domaine (plateformes, infrastructures nationales et/ou européennes) se sont bien saisies des enjeux environnementaux et agroécologiques ou de la nécessité d'une alimentation respectueuse de l'environnement et de la santé du citoyen. A moyen terme, émergeront également des entités qui traiteront soit de problèmes de santé liés à des composantes de l'environnement, soit des technologies de restauration de l'environnement qui mettent en œuvre des services et des développements à des TRL 3 à 4 dans les domaines des sciences de l'ingénieur (cf. § II.4), souvent en lien avec des partenaires privés/industriels.

EN RÉSUMÉ

L'enjeu majeur, pour les scientifiques, est de pouvoir présenter une offre de service claire dans le domaine très transversal de l'alimentation humaine (ressources/production, innovations technologiques/transformation) tout en maintenant le dialogue des communautés au sein de chacun des domaines concernés (sciences biologiques fondamentales, sciences de l'environnement et sciences humaines et sociales). L'organisation et la lisibilité des feuilles de route nationales et européenne peuvent et doivent y contribuer.

4/ RESSOURCES NATURELLES

Le terme « ressources naturelles » désigne ici les ressources en eau et en sol, les ressources biologiques terrestres et marines, ainsi que les ressources minérales et énergétiques. Globalement, depuis le début des années 1970, l'Humanité surexploite les ressources naturelles[95]. Ainsi, l'empreinte actuelle de l'Homme sur son environnement excède la capacité moyenne de notre planète à renouveler ses ressources naturelles, en raison notamment du modèle de développement suivi jusqu'à présent (transport, habitat, alimentation, énergie et industrie), à la fois consommateur, énergivore et polluant. D'après l'ONG Global Footprint Network, le « Jour du dépassement », qui marque le jour de l'année où l'humanité a épuisé les ressources renouvelables de la planète, arrive chaque année un peu plus tôt. En 2019, il se situait fin juillet.

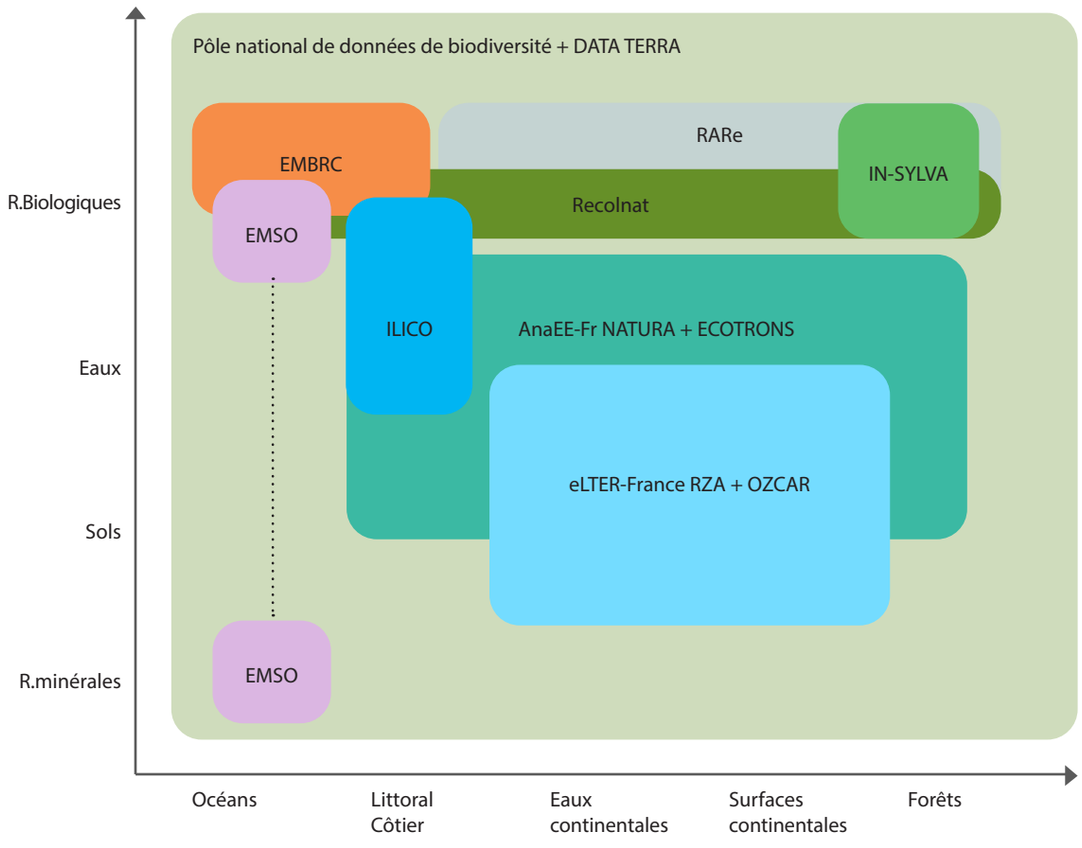
Dans un contexte de changement climatique et de croissance démographique, l'enjeu autour des ressources naturelles est celui d'une transition vers une économie écologique, prenant en compte la finitude de ressources critiques, voire dans certains cas non-renouvelables. Par exemple, le développement technologique, notamment en électronique, accroît la diversité de la demande en ressources minières en s'intéressant à des éléments variés et parfois rares à l'échelle du globe.

Ainsi, pour répondre aux besoins des sociétés, l'élaboration des modèles de gestion soutenable de ces ressources nécessite :

- d'évaluer non seulement les stocks disponibles et leur exploitabilité, mais aussi leur dynamique de renouvellement ;
- d'évaluer la qualité des ressources ;
- d'identifier les disparités géographiques en termes, à la fois, de capacités de production et de besoins, tout en intégrant les enjeux d'accessibilité, dans leurs dimensions économique et géostratégique ;
- d'évaluer et de maîtriser l'impact de l'exploitation sur l'environnement et sur le territoire ;
- de limiter l'utilisation de ces ressources et d'exploiter au maximum le potentiel de recyclage ;
- de développer des alternatives à faible empreinte écologique.

95. Lin et al., 2018. Ecological footprint accounting for countries: Updates and results of the national footprint accounts, 2012–2018. Resources, 7, 58; https://doi.org/10.3390/resources7030058.

FIGURE 7 PAYSAGE DES INFRASTRUCTURES DE RECHERCHE FRANÇAISES DANS LE DOMAINE DES RESSOURCES NATURELLES. L'ENCADRÉ ORANGE INDIQUE UNE INFRASTRUCTURE COMMUNE AVEC LE DOMAINE BIOLOGIE-SANTÉ. NE SONT PAS MENTIONNÉES LES INFRASTRUCTURES LOGISTIQUES (FOF, ECORD-IODP).



Réponse du dispositif à l'enjeu

La question des ressources est transversale aux infrastructures de recherche (Figure 7) et concerne de nombreux domaines des géosciences, de l'écologie et de la biologie.

Pour un certain nombre d'entre elles, l'inventaire et le suivi entrent explicitement, et depuis longtemps, dans les missions des organismes de recherche (eaux souterraines, ressources minérales, géothermie et sous-sol au BRGM, ressources halieutiques et gestion des contrats d'exploration – permis nodules, permis sulfures – à l'Ifremer, sols à INRAE, etc.). Ces organismes sont également sollicités pour mener des études sur l'impact environnemental de l'exploration et de l'exploitation des ressources[96]. Les infrastructures de recherche peuvent cependant apporter immédiatement un accès inter-organismes et interdisciplinaire utile, voire parfois indispensable à la valorisation de ces inventaires.

96. Voir par exemple l'ESCo - les impacts environnementaux de l'exploration et de l'exploitation des ressources minérales profondes (https://wwz.ifremer.fr/Actualites-et-Agenda/Toutes-les-actualites/Archives/2014/ESCO-les-impacts-environnementaux-de-l-exploration-et-de-l-exploitation-des-ressources-minerales-profondes).

La caractérisation de ressources essentielles a été inscrite dans le cahier des charges de certaines infrastructures de recherche depuis leur création. Le cas de la biodiversité envisagée comme une ressource a été détaillé précédemment (cf. § II.1). De même, les recherches sur la durabilité et la qualité des ressources en eaux et en sols, in natura, sont explicitement parmi les cibles de eLTER-France OZCAR et RZA et d'AnaEE-France NATURA et ÉCOTRONS, à la fois pour le territoire métropolitain et pour l'outre-mer français et les pays du Sud. D'autres dispositifs nationaux organisés comme des entités de recherche et de services existent pour les sols (InfoSol, Conservatoire Européen des Echantillons de Sol) et sont en cours d'organisation sous une forme distribuée.

Si In-Sylva-France étudie les ressources forestières, l'inventaire forestier national et son pilotage sont assurés par l'IGN et l'ONF. L'enjeu réside dans l'interconnexion des données de ces dispositifs avec celles produites par les IR traitant de la forêt au niveau national comme européen, afin de rendre facilement accessible aux chercheurs des ensembles complets de données dans le respect des principes FAIR.

Les ressources biologiques marines sont suivies par EMBRC-France. EMSO-France et ILICO contribuent aux connaissances sur ces ressources dans les milieux océaniques profonds et côtiers respectivement. Signalons que la FOF mène des missions d'exploration qui contribuent à l'inventaire des ressources minérales marines profondes (nodules polymétalliques, encroûtements, sulfures hydrothermaux, hydrogène naturel) et des ressources biologiques. Les forages conduits dans le cadre des campagnes d'ECORD/IODP apportent des informations géologiques utiles pour comprendre la mise en place de ressources minérales en contexte océanique. Enfin, l'infrastructure DATA TERRA a naturellement vocation à devenir le point d'accès central aux données validées scientifiquement sur l'évolution des ressources.

Manques

Par comparaison aux autres, les problématiques relevant des ressources en matériaux et en combustibles sont paradoxalement nettement moins bien couvertes à l'heure actuelle par le dispositif des infrastructures. La gestion, l'exploitation et la prospection des ressources minières et énergétiques traditionnelles restent principalement l'apanage du secteur privé, nécessairement piloté par des objectifs économiques. Il en va de même, dans une large mesure, des ressources minérales nouvelles ou émergentes, qui deviennent primordiales, en réponse à des besoins industriels nouveaux (métaux rares en électronique) ou dans la perspective des besoins générés par la transition énergétique et l'essor des énergies renouvelables (métaux traditionnels, granulats). Si l'expertise scientifique sur ces questions se situe clairement au sein de la communauté des sciences de la Terre, la mobilisation et la structuration en vue d'instruire une vision synthétique d'ensemble restent largement à amplifier, en vue de pouvoir établir des scénarii prospectifs fiables de gestion publique de ces ressources. Ainsi, l'absence d'une réelle stratégie nationale pour l'exploitation des ressources minérales a été soulignée dans un récent rapport commun entre l'Académie

des Sciences et l'Académie des Technologies[97]. La base scientifique d'une telle stratégie reste largement à conforter et l'évolution du dispositif des infrastructures de recherche devra y prendre toute sa place.

Parallèlement, il faut souligner que l'étude du sol, considéré comme une ressource cruciale pour l'avenir de l'humanité, reste à l'heure actuelle largement en deçà des enjeux et de leur urgence. Si la recherche fondamentale sur le rôle du sol en tant que compartiment clé de la « zone critique » a beaucoup progressé au cours de la dernière décennie et est maintenant pleinement pris en compte, à la fois sur le plan biogéochimique (eLTER-France OZCAR), et sur le plan biologique (AnaEE-France), la vision synthétique globale et régionale de la soutenabilité de l'usage des sols[98], en contexte de changement climatique et d'artificialisation des surfaces continentales[99], devra à l'avenir être davantage prioritaire en France.

En France, le « Plan de programmation des ressources », élément de la « Stratégie nationale de transition vers l'économie circulaire » fournit le cadre de cette réflexion et des actions qui en découlent. Ce plan, finalisé en 2017, doit être revu tous les 5 ans. L'implication de la communauté scientifique sera nécessaire pour l'établissement des meilleurs indicateurs.

97. Rapport de l'Académie des Sciences et de l'Académie des Technologies (mai 2018) coordonné par Ghislain de Marsily et Bernard Tardieu. Stratégie d'utilisation des ressources du sous-sol pour la transition énergétique française. Les métaux rares. 146p.

98. Prospective AllEnvi « ScenENVI » ;https://www.allenvi.fr/actualites/2017/scenenvi-futurs-pour-la-planete

99. Rapport GIEC Sept 2019 ;https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/09/sroc-press-release-fr.pdf

EN RÉSUMÉ

Les infrastructures de recherche de la feuille de route nationale contribuent à la problématique de l'étude de certaines ressources naturelles (eaux, sols, biologiques, marines…), mais les enjeux associés restent cependant actuellement peu visibles dans leurs objectifs. Elles ont néanmoins la capacité de se positionner comme des acteurs centraux pour certaines ressources, y compris dans la centralisation et la mise en forme des données. A terme, les pôles de données devraient développer des services orientés vers ces enjeux et promouvoir des passerelles entre les infrastructures concernées par une même ressource et par des ressources en interaction dans les milieux. En effet, les problématiques de ressources ne peuvent plus désormais être considérées isolément les unes des autres, comme un catalogue de sujets juxtaposés et indépendants.

© PIREN-SEINE - Alexandre Deloménie

5/ TERRITOIRES

Si les définitions du terme « territoire » sont nombreuses, elles considèrent toutes l'existence d'une zone géographiquement délimitée et l'identification d'activités humaines partagées. Dans le cadre des sciences de l'environnement, la gestion des territoires a été mise majoritairement en relation avec la disponibilité des ressources naturelles et de la durabilité de ces ressources et des services écosystémiques qu'elles procurent.

Comprendre les dynamiques des territoires nécessite d'avoir une vision systémique, dans un système d'échelles emboitées (du global au local et réciproquement ; du passé au présent), afin d'anticiper et promouvoir des transformations au plus près des enjeux territoriaux, des acteurs, des secteurs économiques et des politiques publiques. De plus, les territoires sont les lieux privilégiés de l'émergence d'expérimentations et de réponses innovantes face aux enjeux d'adaptation et d'atténuation du changement global. Ces dynamiques territoriales ont vocation à appuyer les transitions, énergétique et écologique, notamment pour atteindre la neutralité carbone, à garantir la protection de la biodiversité et plus largement des ressources naturelles et à améliorer la capacité d'adaptation des socio-écosystèmes face à l'augmentation des aléas. Elles concernent, directement ou indirectement, les habitants de ces territoires dont les modes de vie et les aspirations doivent être pris en compte.
La période contemporaine est marquée par trois processus interdépendants :

- une urbanisation planétaire qui a déjà atteint un niveau inédit dans l'histoire (en 2050, 75 % de la population mondiale vivra en zone urbaine) et qui continue d'augmenter rapidement ;
- des changements globaux (changement climatique, raréfaction et appauvrissement des terres arables, épuisement de certaines ressources naturelles essentielles aux activités humaines, pollution des milieux, perte de biodiversité, etc.) ;
- une mondialisation croissante des échanges (biens, personnes et flux immatériels).

Réponse du dispositif à l'enjeu

Accompagner la transition des territoires nécessite de renforcer les approches interdisciplinaires qui participent à la modélisation des écosystèmes et au développement d'approches renouvelées travaillant sur la préservation des équilibres, en envisageant les différentes dimensions (techniques, sociales, environnementales, économiques et politiques).

Cette démarche apparaît dans différentes infrastructures, en lien avec des acteurs territoriaux, ce qui permet la prise en compte de leurs problématiques. L'infrastructure eLTER-France

RZA travaille autour d'un « schéma conceptuel » commun, établi dans le cadre théorique des socio-écosystèmes. Cette approche conjointe « sociétés » et « écosystèmes » se veut systémique et territoriale, dans un contexte de réponse au changement global. Cette IR est structurée en grandes unités territoriales appelées zones ateliers (par exemple : la Zone Atelier du Bassin du Rhône ou la Zone atelier Armorique). eLTER-France OZCAR et ILICO contribuent à la problématique des territoires en documentant l'évolution des systèmes physiques, biologiques et biochimiques face aux forçages naturels et anthropiques auxquels ils sont confrontés, la première sur les surfaces continentales (par exemple, l'OPE qui s'intéresse aux effets d'un potentiel chantier industriel) et la seconde sur les milieux côtiers et littoraux. Quant à AnaEE-France NATURA, celle-ci conduit des expérimentations et observations sur la sensibilité d'écosystèmes prairiaux, cultivés, lacustres ou forestiers aux changements globaux. Les sites d'étude instrumentés sont répartis sur l'ensemble du territoire national (y compris ultramarins), dans certains pays de la zone intertropicale ou équatoriale et en régions polaires.

Sur les territoires urbains et péri-urbains, les dispositifs sont encore peu nombreux, hormis ACTRIS-France pour le suivi de la qualité de l'air, ICOS-France pour le suivi des GES et de plus en plus de sites d'eLTER-France comme les zones ateliers Environnementale Urbaine ou Armorique d'eLTER-France RZA et l'observatoire OZCAR de l'Yzeron qui s'intéressent aux enjeux environnementaux sur un territoire urbanisé (Strasbourg, Rennes et Lyon respectivement).

Toutes ces infrastructures produisent des données qui alimentent DATA TERRA (pôle Théia de données sur les surfaces continentales), qui offre également l'accès à des produits scientifiques issus de l'observation satellitaire, contribuant à accompagner les acteurs publics du territoire dans l'utilisation des données scientifiques.

Manques

Le milieu urbain, caractérisé par des problématiques spécifiques, reste assez peu documenté avec les infrastructures de recherche actuelles. Il faudrait d'une part améliorer le partage des données existantes entre les différents collecteurs d'information, y compris les organismes détenteurs de données historiques, mais aussi coordonner l'implantation des réseaux de mesures pour la recherche en milieu urbain. Ces réseaux concernent à la fois la biodiversité, l'écotoxicologie, la qualité de l'eau et de l'air (y compris pour le suivi des GES), les caractéristiques des techno-sols, etc.

L'usage des observations pour les politiques publiques pourrait être optimisé par une meilleure utilisation des résultats et des données de la recherche par les gestionnaires et les parties prenantes, notamment. Plus généralement, le partage des données entre plusieurs collecteurs (publics et privés, du local au national) est encore insuffisamment structuré. A une échelle très locale, celle de la ville, du bâti et des grandes infrastructures construites, l'échange des données avec le monde de l'environnement est encore très difficile et mérite d'être abordé de façon holistique pour permettre de modéliser le comportement des systèmes urbains dans l'ensemble de leurs dimensions. Les pôles de données DATA TERRA et PNDB pourraient jouer ce rôle de structuration et d'accompagnement des acteurs publics aux données scientifiques en lien avec les partenariats locaux et privés, en lien avec les plateformes que mettent en place ces acteurs.

Au-delà du suivi du cadre physique et écologique des territoires, un effort reste à produire pour renforcer les approches sociales et sociétales par les SHS, par exemple par

le suivi de cohortes. Enfin, il apparaît également nécessaire de croiser les effets de la transition environnementale de ces territoires avec les autres transitions qu'ils sont amenés à subir : numérique, sociétale, alimentaire, énergétique, etc.

EN RÉSUMÉ

Pour répondre à la problématique de la recherche sur les transitions territoriales, les liens établis entre acteurs locaux et scientifiques sont incontournables. Une approche conjointe « sociétés » et « écosystèmes » doit être systémique et territoriale, dans un contexte de réponse au changement global. Une telle démarche dépasse le cadre des infrastructures actuelles du domaine de l'environnement. Elle pourrait être développée, notamment sur les territoires urbains ou péri-urbains et ruraux, en interface avec les autres alliances de la recherche et leurs infrastructures du fait de son positionnement aux interfaces, entre les approches faisant appel aux sciences de l'environnement et aux sciences humaines et sociales.

© La nouvelle république

6/ RISQUES

Le changement global, dans toutes ses composantes (climat, urbanisation, pollution, etc.), conduit à de nouvelles situations à risque pour les sociétés (risques naturels et catastrophes liées aux événements extrêmes, risques sanitaires ou technologiques, etc.) et pour les milieux (risques liés à la présence de polluants, aux invasions d'espèces, etc.). La réduction des risques, ou leur prévention, fait ainsi partie des problèmes cruciaux vis-à-vis desquels la demande de la société va croissant. Cette demande est amplifiée par la forte médiatisation des catastrophes et des crises (information en continu, réseaux sociaux, etc.).

Les risques naturels intègrent les risques climatiques (tempêtes, inondation, sécheresse, feux de forêts, écoulement torrentiel, érosion/dépôt, coulée de boue, retrait-gonflement des argiles, rupture d'ouvrages de protection, rupture des digues et barrages, etc.) mais également ceux induits par d'autres phénomènes actifs sur les versants (avalanche, chute de blocs, risque d'origine glaciaire, ruissellement intense, etc.) ou dans les zones tectoniquement actives (sismicité, volcanisme) ou les zones littorales (submersion côtière, tsunami).

La compréhension des facteurs de risque sur l'environnement et la société, et le progrès en matière de maîtrise du risque dans toutes ses dimensions font appel à des recherches interdisciplinaires associant l'observation de l'environnement et l'estimation de la vulnérabilité de nos sociétés. Pour ce qui concerne les phénomènes à long terme — tels que l'exposition à des polluants, l'effet de la hausse graduelle des températures, etc. —, l'observation des impacts sur les socio-écosystèmes reste un défi tant en termes de méthodologie que de moyens nécessaires. Les bouleversements écologiques induits par les changements globaux et l'activité anthropique rendent plus fréquents et plus intenses les menaces sanitaires infectieuses. Celles-ci pèsent sur les populations humaines mais aussi animales (faune domestique et faune sauvage) et les plantes (cultivées, forestières sauvages). Les recherches disciplinaires et pluridisciplinaires nécessaires à leur détection précoce, leur prévention et leur contrôle font appel aux différentes disciplines (sciences et technologies) mises en œuvre dans le domaine de la santé globale (« *One Health* »).

Si les besoins opérationnels sont réels, il est clair que la recherche est encore nécessaire, tant les connaissances des phénomènes, de leurs impacts ou les méthodes d'évaluation des risques sont lacunaires dans un contexte de changements à la fois climatiques, économiques et sociaux. Les questions de prévention et de réduction des risques, ainsi que de gestion des crises qui en découlent, doivent donc s'inscrire dans un ensemble d'initiatives de structuration de la recherche

à différentes échelles, y compris en termes d'infrastructures de recherche. En particulier, il y a des besoins de projections fiables à diverses échelles et de données historiques concernant les événements extrêmes.

Les enjeux concernés incluent les risques sur les populations et les communautés animales et végétales, les constructions (bâti, infrastructures critiques, etc.), les activités économiques, et plus largement la vulnérabilité sociale et environnementale des territoires aux évènements passés, actuels et futurs.

Réponse du dispositif à l'enjeu

Les dispositifs actuels qui répondent aux besoins d'observation sous-jacents aux aléas se répartissent dans l'ensemble des infrastructures du domaine de l'environnement. Les infrastructures contribuent au développement de connaissances sur les phénomènes multi-échelles caractérisés par des fluctuations spatio-temporelles particulièrement complexes, et ce en termes de déclenchement, de propagation et d'interaction avec l'Homme et la société. Elles permettent d'inscrire les risques dans un cadre multivarié spatial. Les données de la recherche sur les aléas se retrouvent auprès des organismes et, à terme, dans DATA TERRA. Les données de simulations climatiques de référence sont mises à disposition dans CLIMERI-France.

De par l'obligation de l'État d'assurer la protection civile, des missions nationales de surveillance et d'alerte face aux catastrophes sont confiées à différents organismes nationaux. Ces missions de surveillance complètent les observations à long terme menées dans les infrastructures de recherche qui visent à avancer dans la compréhension des aléas.

Concernant les risques telluriques, le CEA est en charge de la détection de tout événement sismique naturel ou généré par l'activité humaine survenant sur le territoire national. Le CEA opère, depuis 2012, le Centre National d'Alerte aux Tsunamis (CENALT) chargé de prévenir les autorités de l'occurrence d'un séisme pouvant générer un tsunami susceptible de toucher les côtes métropolitaines. Le BRGM assure nationalement la cartographie des risques liés au sol et au sous-sol. La surveillance volcanique est organisée localement avec l'appui des observatoires volcanologiques de l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP). La FOF contribue également à cet enjeu en mobilisant ses navires océanographiques pour l'accès aux zones sous-marines (exemple de la découverte de la naissance d'un nouveau volcan sous-marin en 2018-2019 au large de Mayotte[100]).À des fins de recherche, RESIF/EPOS rassemble les moyens géophysiques en sismologie et gravimétrie pour étudier les déformations lentes et les phénomènes de rupture : séismes, glissements de terrain, mais aussi activité volcanique, notamment en Outre-Mer. Outre le déploiement d'instruments sur le territoire national, notons qu'une station du réseau se situe à la station Concordia sur le plateau Antarctique. Les données acquises par EMSO-France sur la structure géologique du plancher océanique fournissent également des informations utiles pour comprendre et modéliser les risques telluriques (tectoniques, volcaniques, hydrothermaux) et gravitaires. Les données acquises peuvent également contribuer à la surveillance des risques associés.

100. Des opérations d'observation et de recherche, menées par plusieurs établissements et laboratoires de recherche français (CNRS/BRGM/Ifremer/Institut de physique du globe de Paris et de Strasbourg) dans le cadre d'un programme CNRS financé par le ministère chargé de la recherche et le ministère de la transition écologique et solidaire ont permis d'associer une succession d'épisodes sismiques à l'Est de Mayotte dans l'océan Indien à la naissance d'un nouveau volcan sous-marin.

Concernant le risque de submersion marine, ILICO contribue à apporter des services aux collectivités pour la prévention des risques littoraux et côtiers. En complément de la cartographie tridimensionnelle à haute résolution de la frange littorale réalisée conjointement par le SHOM et l'IGN, ILICO fournit sur des sites particuliers des données sur l'évolution du trait de côte, nécessaires à l'étude du risque de submersion marine sur les côtes françaises.

Concernant le risque hydrologique, les infrastructures eLTER-France, OZCAR et RZA, ont mis en place des réseaux d'observation à long terme permettant le suivi des flux d'eau et d'éléments dans des bassins versants, en lien avec des partenaires locaux. Les modélisations des données permettent d'alimenter la recherche sur le risque hydrologique, nival et hydro-glaciologique des cours d'eau français mais aussi dans la zone intertropicale. Au plan national, l'Enquête Permanente sur les Avalanches (EPA) d'INRAE apporte aussi des données sur le risque avalancheux. Par ailleurs, les organismes tels que Météo-France, le BRGM et les agences de l'eau produisent des données sur l'eau pour les gestionnaires et les décideurs. Dans le cadre des missions d'appui aux politiques publiques du Ministère en charge de l'Environnement, les services de l'État gèrent une base de données hydrologiques[101] et produisent des cartes de risque hydrologique. Ces données servent aussi à la communauté scientifique.

Les simulations climatiques de CLIMERI-France fournissent des simulations de référence pour différents scénarios, à la fois à l'échelle globale et pour différentes régions du globe. Elles servent également de référence pour la réalisation de simulations à l'échelle de la métropole, mises à disposition dans la base de données nationale DRIAS[102].

Les risques anthropiques chimiques et sanitaires sont abordés dans l'initiative inter-organismes dédiée à l'écotoxicologie des pesticides RECOTOX (INRAE et CNRS). Pour la composante « risques sanitaires », l'ANSES est nationalement en charge de l'évaluation des risques et bénéfices sanitaires souvent au prisme des sciences humaines et sociales. Les expertises sont menées par des plateformes d'épidémio-surveillance[103] pour les risques sanitaires en lien avec l'environnement, associant l'ANSES et des organismes de recherche et de développement notamment. Les infrastructures de recherche impliquées relèvent plutôt du domaine Biologie et santé mais aussi parfois conjointement du domaine de l'environnement. Elles contribuent à l'expertise publique pour la gestion du risque, aux partenariats publics-privés pour les méthodes de détection et de contrôle, mais également aux recherches d'amont nécessaires, disciplinaires comme pluridisciplinaires. On peut ainsi citer Emerg'In et VetBioNet, au niveau Européen, pour les maladies infectieuses animales et de la faune sauvage, terrestre comme aquatique.

Manques

Au-delà de l'observation, les infrastructures de recherche peuvent contribuer de manière plus directe à la prévention. Certains sites pourraient être adaptés, moyennant un rattachement à un environnement opérationnel (fonctionnement 24h/24h, défaut de service maîtrisé, etc.), pour développer des outils d'alerte (détection de signaux faibles ou précoces) et de diffusion, comme c'est déjà le cas dans le domaine du risque volcanique par exemple. Ces approches pourraient être testées et implémentées, via des méthodes pratiques, dans des systèmes qui diminuent les effets des risques, contribuent à la prise de décision, et sont capables de fonctionner dans un environnement à risque. En période de crise, les données de capteurs physiques opérés par les infrastructures de recherche pourraient être utilement couplées aux données issues des réseaux sociaux pour affiner les modélisations et améliorer les réponses. Cela nécessitera de faciliter techniquement ce couplage et de développer les approches scientifiques combinant capteurs physiques et « capteurs humains ».

La connaissance, la prévention et la réduction des risques pourraient bénéficier d'un accès plus transversal à l'ensemble des données, aussi bien celles issues des dispositifs de recherche que celles venant de l'observation pour l'appui aux politiques publiques. Cette transversalité pourrait être améliorée au travers de services mis en place dans DATA TERRA.

Si certains aléas ou risques sont bien couverts, aucune infrastructure nationale de recherche n'existe à l'interface entre les domaines système Terre et de l'environnement et Biologie-Santé. Le devenir de l'initiative RECOTOX est à considérer dans une réflexion qui dépasserait la problématique des pesticides en incluant un ensemble plus large de stress chimiques, biologiques et physiques sur l'environnement. De même, les recherches sur les maladies émergentes végétales souffrent d'un manque d'infrastructures de recherche hautement sécurisées, dédiées et mobilisables. L'initiative actuelle sur le pôle d'infectiologie végétale de Bordeaux essaie de combler ce manque en construisant une infrastructure d'infectiologie expérimentale et de collections pour les agents de quarantaine et les agents pathogènes émergents des plantes et des forêts.

EN RÉSUMÉ

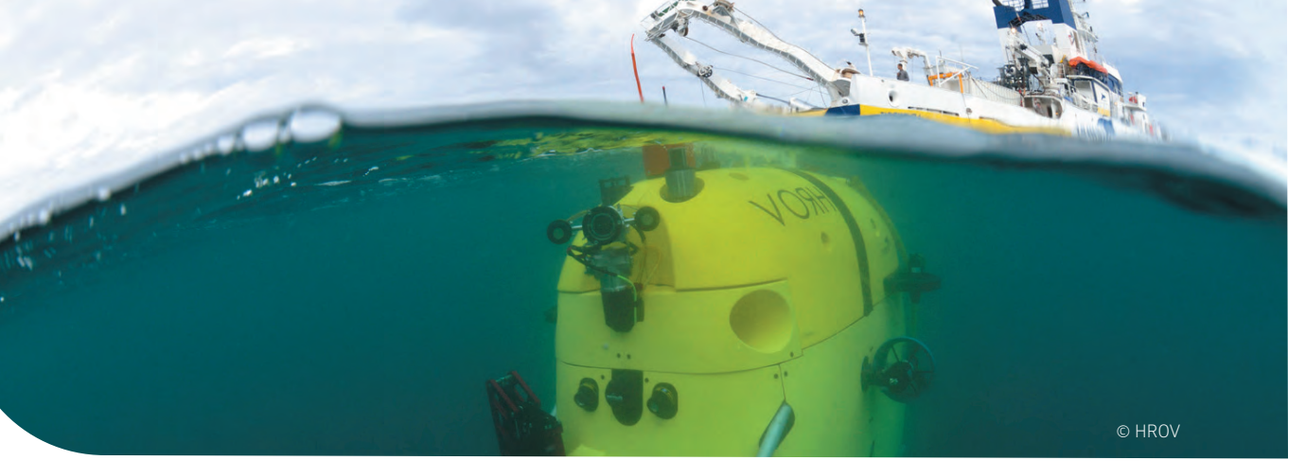
Les infrastructures de recherche permettent d'aborder de façon équilibrée certains risques (telluriques, hydroclimatiques et climatiques) dans leur dimension biophysique (mécanique, rhéologie, climat, chimie, biologie, etc.), mathématique (ex. métrique, paradigme décisionnel) et socio-économico-historique (construction, perceptions, représentations, impacts et vulnérabilités).
L'ensemble des risques naturels et environnementaux n'est, à l'heure actuelle, pas couvert dans des infrastructures nationales de recherche, notamment pour les études One health, même si certains éléments existent dans des infrastructures.

101. www.hydro.eaufrance.fr

102. Drias (www.drias-climat.fr)-les futurs du climat- a pour vocation de mettre à disposition des projections climatiques régionalisées réalisées dans les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRM-GAME). Les informations climatiques sont délivrées sous différentes formes graphiques ou numériques.

103. Plateforme d'épidémiosurveillance en santé animale-ESA, www.plateforme-esa.fr ; Plateforme d'épidémiosurveillance en santé végétal-ESV, https://plateforme-esv.fr/ ; Plateforme de surveillance de la chaîne alimentaire-SCA.

Positionnement des infrastructures pour répondre aux grands enjeux scientifiques et sociétaux



© HROV

7/ BESOINS TECHNOLOGIQUES ET D'INNOVATIONS

La mise en œuvre de systèmes d'observation performants pour répondre à une approche intégrée des processus (observation/expérimentation *in situ*, satellite, modélisation voire commande des expérimentations) via des approches pluridisciplinaires, va de pair avec des innovations technologiques et méthodologiques. Les instruments déployés dans les infrastructures de recherche pour les sciences du système Terre et de l'environnement connaissent une importante évolution notamment pour permettre l'accès à de nouvelles informations (variables physiques, chimiques et biologiques) et un échantillonnage spatial et temporel accru des milieux, ainsi que pour faciliter l'accès aux conditions extrêmes (milieux océaniques, fonds marins profonds, haute atmosphère, zones polaires et glaciers d'altitude, volcans, etc.). Il ne faut pas négliger la difficulté potentielle de la logistique nécessaire pour le suivi et la maintenance de telles stations distribuées parfois sur de larges étendues jusqu'à l'échelle d'une région complète et dans des conditions extrêmes.

L'apport des technologies émergentes pour les capteurs, permettant leur miniaturisation, leur production en série, la question de la fiabilité pour de grandes séries de capteurs sont des enjeux importants. Les besoins de réseaux bas coût, de capteurs miniaturisés fiables à basse consommation énergétique, avec une large couverture spatiale et permettant un maintien en conditions opérationnelles sur le long terme devraient s'accentuer dans la prochaine décennie.

L'avènement des technologies de séquençage ADN haut débit et de la métabolomique a par exemple considérablement modifié les capacités de description de la biodiversité. Aujourd'hui, de nouvelles méthodes proposent d'inventorier les espèces et les communautés d'organismes présentes dans un milieu directement via l'analyse de traces d'ADN présentes dans les milieux (ADN environnemental – eDNA). Plus spécifiquement, la transcriptomique (qui analyse l'ARN) permet d'accéder aux espèces et communautés d'intérêt écologique et fonctionnel, y compris les espèces rares, et de mieux comprendre le fonctionnement d'un écosystème et son évolution en réponse aux changements globaux. A plus long terme, le développement d'outils robotisés de type génosensors pour le séquençage *in situ* devrait être possible, voire l'analyse du métabolome par des entités de terrain. Le développement de biocapteurs pour la détection de matériel biologique, de toxines, de molécules diverses et variées, est un enjeu international récent et leur usage dans un cadre environnemental est encore limité. Par ailleurs, comme dans le domaine de la biologie, il reste à aborder par ces technologies nouvelles et grâce à des dispositifs innovants, les écosystèmes microbiens et les holobiontes. Ces innovations technologiques doivent se développer en lien avec les infrastructures du domaine Biologie-Santé, notamment celles dédiées aux

technologies « omics », les seules à développer un lien structurel avec les équipementiers : France Génomique, MetaboHub, Profi, IFB (bioinformatique), MGP, etc. Outre l'apport de nouvelles technologies, gérer un réseau volumineux de capteurs distribués, homogènes ou hétérogènes, entraîne de nouveaux défis, qui dépassent celui de la mesure individuelle. Parmi les enjeux les plus importants, il faut souligner la nécessité d'harmoniser les pratiques, de documenter et d'améliorer la qualité de la donnée acquise. La métrologie des capteurs a fortement progressé vers l'harmonisation des mesures sous assurance qualité, en particulier dans le cadre de collaborations européennes avec la mise en place de bonnes pratiques à l'échelle de l'Europe. Ces efforts devraient largement se poursuivre dans la décennie à venir avec des inter-comparaisons de mesures à travers des collaborations multi-instituts (par exemple le European Marine Sensor Calibration Network — réseau européen d'étalonnage des capteurs marins), d'homogénéisation de format des données, d'intégration des réseaux d'observation et base de données autour de standards internationaux, lorsque cela est pertinent. Le développement et l'application des standards sur les métadonnées et l'échange des données sont critiques pour développer une science interdisciplinaire, indispensable dans le domaine des sciences de l'environnement. Ceci suppose un engagement des acteurs dans les groupes de travail internationaux, tels que ceux de l'Open Geospatial Consortium, qui produisent des standards (repris par l'ISO) par exemple pour décrire de façon générique des « observations et mesures[104] ». Ces standards sont à la base de la mise en place de la Directive européenne INSPIRE[105] qui impose les règles de diffusion des données publiques relatives à l'environnement, règles qui s'imposent aux acteurs d'AllEnvi.

Un deuxième point important est la gestion de l'énergie, qui est centrale pour optimiser la durée d'autonomie des stations d'observation fixes et mobiles et minimiser leur impact. Ce point soulève des défis particuliers lorsqu'il s'agit par exemple de produire de l'énergie en milieu isolé polaire, les températures extrêmement basses constituant encore aujourd'hui un verrou technologique important.

Les processus de transmission et de communication constituent un troisième enjeu important à la fois pour le contrôle/commande des capteurs mais également pour la collecte optimale des données et leur gestion à l'échelle de réseaux distribués opérés de façon collective et qui constituent un système d'observation en soi. Il est réaliste d'envisager, à court terme, d'adapter l'échantillonnage en fonction de la détection d'évènements. L'émergence prochaine de nouvelles constellations de satellites de communication, couvrant les lieux les plus éloignés avec des débits importants, va ouvrir la voie à un saut méthodologique conséquent dans la communication entre capteurs et laboratoires. Cependant, l'impact de ces satellites devra être soigneusement étudié, notamment en termes de nuisance pour certains dispositifs d'étude terrestre et spatiaux.
L'augmentation des capacités d'observation et du volume de données acquises doit s'appuyer sur un développement de technologies issues du big data (i.e., lac de données, data mining, machine learning, intelligence artificielle) incluant, entre autres, le développement de méthodes automatisées à partir d'algorithmes informatiques (traitement du signal et des images, bio-informatique), et de la modélisation. En cela, les IR des sciences de l'environnement ne se différentient pas des infrastructures d'autres domaines mais offrent un vaste panorama de données et de questions scientifiques. Elles doivent également

104. O&M : Observations and Measurements. https://www.ogc.org/standards/om

105. INSPIRE : https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/directive-europeenne-inspire

s'appuyer sur les services et capacités des infrastructures d'autres domaines, comme l'IFB (Institut Français de Bio-informatique) et les centres de calculs nationaux de GENCI (Grand Équipement National de Calcul Intensif).

Dans le domaine de la modélisation, l'accès aux calculateurs les plus performants est nécessaire pour traiter la complexité et le caractère chaotique du système Terre. La fin de la loi de Moore amène cependant de profondes modifications des technologies avec, des architectures plus complexes et hybrides qui vont nécessiter de plus en plus un travail important de refonte des codes si la communauté veut pouvoir bénéficier des technologies de pointe, comme les machines exascales. Ceci s'accompagne d'un enjeu sur la gestion des données de simulations qui risquent d'atteindre l'exabyte avant d'atteindre l'exaflop.

Par ailleurs, la caractérisation des milieux bénéficie des avancées technologiques connues en laboratoire en raison de l'effort réalisé par les équipementiers dans l'intégration des composantes et la miniaturisation. Il s'agit par exemple d'embarquer des équipements dans des unités mobiles pouvant observer à façon des milieux sans immobiliser l'instrumentation (laboratoires mobiles d'AnaEE-France NATURA ou d'eLTER-France OZCAR via l'Équipex CRITEX par exemple).

Sur un autre plan, on constate que, pour répondre aux besoins croissants de mesure *in situ*, l'utilisation de dispositifs non académiques pour le déploiement de mesures standardisées, déjà entamée avec IAGOS-France sur des avions de ligne ou les systèmes « FerryBox » de prélèvements et analyses automatisés sur des navires volontaires, devrait se développer : applications sur appareils mobiles couplées à une question de science participative, partenariat avec le secteur privé pour l'observation (navires, pêche, professionnels, plaisance, structures en mer des énergies marines renouvelables ou pétrolières, câbles, aquaculture, transport maritime), etc. En parallèle aux navires océanographiques, l'utilisation de plateformes autonomes (flotte de drones marins ou aériens, robots sous-marins autonomes, robots terrestres), versatiles, avec de faibles charges utiles (mesure d'un paramètre à l'aide de capteurs miniaturisés) est largement plébiscitée pour l'observation du vivant (acoustique, vidéo/photo) mais également pour l'océanographie côtière et hauturière afin d'augmenter la résolution spatiale et éventuellement pour des prélèvements.

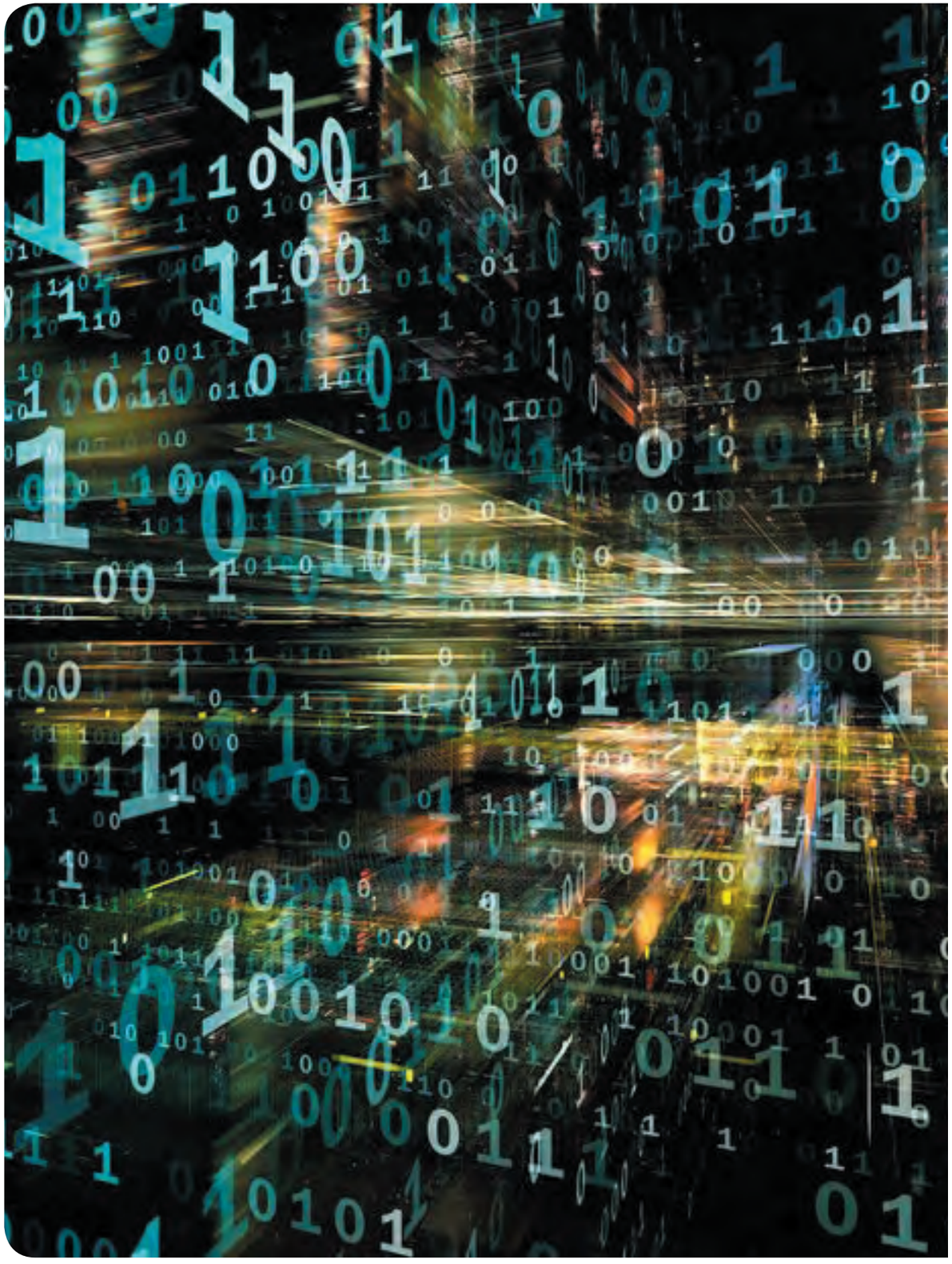
Pour les vecteurs mobiles (drone, ballon…), il convient également de prendre en compte l'évolution de la réglementation incluant les modalités de certification et de diffusion des données. Certaines de ces questions sont transversales et sont déjà abordées dans d'autres contextes, par exemple dans le domaine des constellations de satellites.

Comme dans d'autres domaines scientifiques, les infrastructures de recherche pour les sciences de la Terre et de l'environnement jouent un rôle spécifique pour les développements technologiques et les possibilités d'innovation, notamment compte tenu des conditions sévères de déploiement dans certains milieux. Ces innovations conduisent souvent à la mise sur le marché de nouveaux produits ou services, par des entreprises confirmées ou créées pour l'occasion. À titre d'exemple, 21 % des flotteurs actifs de la TGIR EURO-ARGO ont été développés et commercialisés par une PME française. Ces produits et services peuvent utiliser tout ou partie des développements technologiques menés pour des infrastructures, ainsi que différentes données produites et distribuées. Le niveau de qualité et la certification des données sont en effet un aspect essentiel de crédibilité pour ces services.
Parce qu'elles constituent des plateformes instrumentées, l'accès à certaines infrastructures

Positionnement des infrastructures pour répondre aux grands enjeux scientifiques et sociétaux

peut être précieux pour les industriels désirant tester, qualifier ou étalonner des produits ou des capteurs dans des conditions particulières ou même accéder aux données produites. Comme dans les autres domaines, les équipementiers peuvent être des partenaires socio–économiques de l'innovation des infrastructures de recherche. Il s'agit donc de travailler en partenariat afin de répartir les efforts de montée en compétences entre les IR via les organismes de recherche et les industriels du domaine de l'équipement.

A travers les développements technologiques et les innovations, l'un des enjeux nouveaux est donc le développement d'une animation transverse entre les Infrastructures de l'environnement et celles des autres domaines. Il s'agit de faire bénéficier le plus largement possible les communautés (y compris au niveau européen) des innovations technologiques dans le domaine de l'acquisition de la donnée. Ceci peut représenter un marché plus conséquent, à même de justifier d'importants investissements : et qui nécessite le développement d'un dialogue équilibré et approfondi avec les partenaires industriels.



3. Analyse, recommandations et évolution stratégique du dispositif national

En préambule de cette troisième partie, il est important de rappeler que dans ce document ont été avant tout considérées les entités reconnues comme infrastructure de recherche et inscrites sur les feuilles de route, nationale ou européenne (ESFRI). D'autres dispositifs nationaux d'observation ou d'expérimentation, propres aux organismes ou établissements d'enseignement supérieur et de recherche, membres d'AllEnvi, ont été mentionnés pour compléter l'analyse, mais sans prétendre à l'exhaustivité. Ce document ne cherche donc pas à citer toutes les infrastructures ou dispositifs existants nationalement, régionalement ou localement.

Les communautés scientifiques du domaine Sciences du système Terre et de l'environnement abordent des questions de recherche sur différents enjeux environnementaux dont certains, inter-organismes, sont traités de manière partagée au sein d'AllEnvi (climat, biodiversité, alimentation, ressources naturelles, risques, océan, eaux continentales, territoires). Les infrastructures de recherche de ces communautés s'organisent plutôt par grands compartiments du système Terre (atmosphère, océan, hydrosphère-écosystèmes continentaux et sols, géosphère) et contribuent largement, à apporter des connaissances fondamentales sur le fonctionnement des systèmes qui irriguent les grands enjeux. Certaines infrastructures transversales sortent de ce cadre en ce qu'elles concernent plusieurs voire toutes les composantes : infrastructures logistiques, collections d'échantillons naturels et documents cartographiques/photographiques et e-infrastructures.

Si les conséquences des activités humaines sur l'environnement constituent un forçage clairement pris en compte dans les observations et expérimentations au sein des infrastructures, les effets de l'environnement sur l'Homme ne sont pas directement abordés. Ils relèvent d'avantage d'infrastructures de recherche des sciences biologiques et médicales (Alliance Aviesan) et des sciences humaines et sociales (Alliance Athéna). Dans ce document, ces infrastructures ne sont pas décrites, même s'il est souvent nécessaire de revendiquer tous les domaines scientifiques et technologiques pour comprendre le système Terre et environnement.
Du point de vue méthodologique, cette troisième partie s'appuie sur une analyse du « groupe infrastructures » d'AllEnvi éclairée par des éléments apportés lors d'un séminaire interne, qui s'est tenu le 14 novembre 2019 et qui a rassemblé les porteurs d'infrastructures du domaine sciences du système Terre et de l'environnement et les membres du « groupe infrastructures » de l'alliance.

Il est important de noter que l'analyse et les recommandations présentées ci-après sont exprimées sans hiérarchie ni censure. Elles constituent une vision de l'alliance sur le dispositif des infrastructures du domaine, avec des points d'attention et des évolutions souhaitables, à travers 21 recommandations.

© ASTER

1/ RECOMMANDATIONS TRANSVERSALES

Dans le contexte du changement global, dû à la pression croissante de l'Homme sur l'environnement, et de transitions environnementale et énergétique nécessaires, la recherche scientifique française doit continuer à se mobiliser pour poser des diagnostics et comprendre les processus fondamentaux impliqués dans les dynamiques en cours. Le continuum entre la recherche fondamentale, la recherche finalisée, l'innovation et le monde socio-économique et politique est indispensable pour accélérer le transfert de connaissances vers des solutions et le retour d'expériences et de questionnements de la société vers la recherche. Pour apporter des réponses aux grands enjeux de la planète qui impliquent des processus complexes, le plus souvent sur un temps long et sur des vastes zones géographiques, la recherche s'appuie, depuis plusieurs décennies, sur des dispositifs d'observation et d'expérimentation, labélisés par les organismes de recherche, dont beaucoup se sont organisés en véritables infrastructures de recherche nationales et inter-organismes. Certains de ces dispositifs sont ancrés dans les territoires, en lien avec les parties prenantes (associations, ONG, collectivités, acteurs socio-économiques…). L'agencement actuel des différentes infrastructures de recherche du domaine de l'environnement résulte d'un effort systématique et très soutenu de simplification et de mise en cohérence mené depuis une dizaine d'années par les communautés impliquées.

Recommandation 1

Assurer la durabilité des infrastructures labélisées du domaine sciences du système Terre et environnement, reconnues comme indispensables aux communautés scientifiques.

Si la poursuite d'une démarche d'emboîtement logique et d'unification progressive peut paraître pertinente afin de poursuivre la simplification du dispositif français pour une meilleure lisibilité, il est néanmoins fondamental de ne pas en forcer le rythme, au risque de fragiliser voire de remettre en cause les acquis et les dynamiques actuelles. Les infrastructures doivent rester des organisations au service des communautés de recherche et de leurs partenaires, et doivent donc conserver une dimension et une accessibilité appropriées. Une vision politique, mais très théorique, d'un paysage parfaitement organisé en très grandes entités pourrait conduire à remettre en cause les efforts entrepris depuis de longues années.

Recommandation 2

Ne pas imposer des regroupements de dispositifs d'observation/expérimentation, voire d'infrastructures de recherche, dans des TGIR ou IR nationales et européennes, sans une co-construction avec les communautés scientifiques impliquées et pour répondre à un besoin scientifique.

En sus des satellites, non considérés ici, la recherche environnementale est fortement dépendante de supports logistiques très conséquents comme des bateaux, des avions, des stations polaires, des plateformes, des moyens de forage, indispensables pour accéder à différents milieux difficiles d'accès, mais aussi des moyens de calcul. Ces moyens, nécessairement transversaux entre organismes, garantissent à la France d'être bien classée internationalement en matière de recherche océanique, atmosphérique et polaire.

Recommandation 3

Planifier des ressources financières fléchées pour le renouvellement et la jouvence de grands équipements logistiques avant leur obsolescence, par exemple, en matière de bateaux (FOF), d'avions ou de moyens de calcul.

La plupart des infrastructures existantes du domaine sciences du système Terre et de l'environnement ont des sites distribués sur le territoire national, pour l'étude de différents milieux et parfois depuis longtemps. Des dispositifs sont également implantés à l'étranger, notamment dans certains pays du Sud avec lesquels les organismes français ont des collaborations anciennes. Concernant les infrastructures d'observation/expérimentation, la co-localisation de dispositifs de mesures de plusieurs infrastructures sur un même site peut être envisagée dans le cas d'un besoin scientifique précis. Pour certaines infrastructures, une extension du périmètre géographique et/ou thématique est nécessaire. Par exemple, la recherche climatique manque de données en Méditerranée et en Outre-Mer. Les milieux urbains et péri-urbains sont également sous-représentés actuellement. De même, l'observation de la biodiversité est réalisée ponctuellement dans plusieurs infrastructures. Elle pourrait être renforcée en étant plus systématiquement abordée comme observable des écosystèmes continentaux, littoraux et marins.

Analyse, recommandations et évolution stratégique du dispositif national

Recommandation 4

Pérenniser les sites d'observation/expérimentation pour garantir l'acquisition de séries temporelles sur le long terme, tout en permettant aux infrastructures d'évoluer sur leur couverture géographique de sites (du niveau international jusqu'au maillage à l'échelle des villes et des territoires) et/ou sur les variables suivies.

Enfin, globalement, les infrastructures de recherche (IR/TGIR) restent encore assez peu connues des chercheurs, hors des communautés « rattachées » aux infrastructures, ainsi que des services de l'État, des collectivités territoriales et des acteurs socio-économiques.

Recommandation 5

Mener des actions de communication auprès des chercheurs et des partenaires socio-économiques pour mieux faire connaître les infrastructures de recherche.

© httprocketsetc.com

2/ DOMAINES APPELANT LE DÉVELOPPEMENT DE NOUVELLES INFRASTRUCTURES OU STRUCTURATIONS NATIONALES

L'analyse de la cartographie des infrastructures existantes montre qu'elles couvrent un large spectre des enjeux environnementaux. Dans ce qui suit, les manques sont abordés sous l'angle des dispositifs, des thématiques et des verrous technologiques. La vision est étendue aux manques aux interfaces avec les dispositifs européens et internationaux.

Domaine sciences du système Terre et de l'environnement

• **Dynamique de la haute atmosphère** (neutre ou ionisée) : améliorer les modèles de climat et les prévisions météorologiques à moyen terme et développer de nouveaux services pour la sécurité civile nécessitent la mise en place d'une infrastructure dans ce domaine. Même si elle est absente de l'association internationale EISCAT-3D, la France est bien placée sur cette thématique pour avoir coordonné au niveau européen le projet de *Design Study* ARISE, arrivé à échéance en 2018. La communauté scientifique prépare un projet d'*Integrating Activity* sur cette thématique pour poursuivre les avancées dans ce domaine. Une infrastructure française, qui pourrait être ARISE[106]-France, constituerait le miroir d'une future infrastructure européenne.

• **Océanographie multi-échelles :** afin d'étudier le rôle de l'océan dans la variabilité du climat, les dispositifs logistiques (FOF, ECORD-IODP) et d'observation océanique (EURO-ARGO, EMSO, ICOS-Océan) actuels manquent d'une composante hauturière pour que les infrastructures françaises aient une vision globale physique et chimique de l'océan, en temps réel (en liaison avec le programme Copernicus) et en temps différé. Dans le cadre de la Décennie des Océans de l'ONU (2021-2030), le CNRS et l'Ifremer portent un projet ambitieux de ***French Ocean Observing System*** (Fr-OOS), à échéance 2030, afin de constituer une grande infrastructure de recherche en observation de l'océan global, du côtier au grand fond et au large, regroupant au niveau national ILICO, EMSO, EURO-ARGO ainsi qu'une infrastructure hauturière possible[107]. Cette infrastructure pourrait être le miroir de l'*European Ocean Observing System* (EOOS).

106. ARISE = *Atmospheric dynamics Research InfraStructure in Europe* (Design Study FP7/H2020 2012-2018). Élisabeth Blanc (CEA), coordinatrice du projet, a été lauréate des Étoiles de l'Europe décernées par le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation en décembre 2019 pour la coordination d'ARISE.

107. Actuellement en réflexion et qui s'appuierait sur les services d'observation des paramètres essentiels de l'océan comme CTD-O2.

• **Ressources naturelles** (minérales et énergétiques) : dans ce domaine, il n'existe pas de centralisation et de mise en forme des données pour l'ensemble des ressources alors que celles-ci ne peuvent plus être considérées indépendamment les unes des autres dans le contexte de leur raréfaction au niveau mondial. Une difficulté supplémentaire réside dans la présence importante d'intérêts privés autour de ces ressources. Cette réflexion doit-elle aboutir à une nouvelle infrastructure de recherche, en dehors des données qui figurent déjà dans DATA TERRA ou le PNDB ?

• **Carothèques et lithothèques :** les échantillons géologiques, collectés avec des moyens logistiques lourds sont souvent rares car prélevés dans des sites difficiles d'accès. Ils sont de plus actuellement dispersés dans de nombreux laboratoires. Une réflexion doit être menée au niveau national pour améliorer leur collecte, et leur accessibilité, ainsi que celle des données, y compris les méthodes de référencement. Cette réflexion doit-elle aboutir à une nouvelle infrastructure intégrant les trois aspects : (i) moyens de carottage et de foration, (ii) stockage et mise à disposition des échantillons et (iii) mise à disposition des données ?

• **Moyens analytiques géochimiques :** pour répondre au besoin de traçage et de caractérisation des processus terrestres et planétaires, des outils géochimiques performants sont nécessaires. La mise en cohérence du parc instrumental français en géochimie analytique, englobant des plateformes nationales et des laboratoires spécialisés, répondra aux besoins de développement des moyens nationaux et à l'amélioration des instruments et des méthodes. Il s'agira, à terme, de partager les grands moyens analytiques et les données géochimiques au sein des communautés scientifiques. Le projet actuel d'infrastructure RéGEF (Réseau Géochimique et Expérimental Français) est l'un des éléments de cette réflexion.

Recommandation 6

Instruire, dans le cadre d'un paysage évolutif, de nouvelles candidatures d'infrastructures de recherche sur la feuille de route nationale, dans le domaine sciences du système Terre et de l'environnement, dans les secteurs de la dynamique de la haute atmosphère, de l'océan hauturier et à terme de l'océan global, et des moyens analytiques géochimiques.

Recommandation 7

Poursuivre la réflexion sur la structuration nationale d'une banque d'échantillons géologiques, sur les moyens de les collecter et de les analyser et sur l'accès aux données correspondantes.

Recommandation 8

Etudier la pertinence et la faisabilité d'une structuration nationale pour l'ensemble des ressources naturelles, minérales et énergétiques.

Domaines inter-alliances

• **Alimentation/nutrition/santé :** pour répondre aux enjeux de l'alimentation et de la nutrition humaine, il est indispensable d'avancer dans l'organisation de dispositifs partagés de recherche et sur l'intégration des données de production, de transformation (caractérisation des aliments), de distribution, de consommations (cohortes) ainsi que des données et modèles économiques. Ce domaine est à l'interface de trois alliances de recherche (AllEnvi, Athéna, Aviesan). La mise en place d'une infrastructure sur l'alimentation et la nutrition, inter-alliances et inter-domaines, s'avère complexe à mener à court terme. Dans la feuille de route nationale, ces infrastructures potentielles devront trouver leurs places aux côtés d'EMPHASIS (domaines Biologie-santé et Sciences du système Terre et de l'environnement), RARe, F-CRIN, CONSTANCE (Biologie-Santé) et PROGEDO (Sciences humaines et sociales). Les défis que posent les maladies infectieuses émergentes, récurrentes dans les populations humaines, animales et végétales, nécessitent de développer des liens structuraux entre des infrastructures spécialisées (existantes comme RARe, EMERG'IN… ou à créer comme pour l'infectiologie végétale et forestière), des infrastructures génériques et technologiques, et des centres et plateformes d'expertise.

• **Toxicologie-écotoxicologie :** si certains aléas ou risques naturels sont bien couverts par les dispositifs actuels, aucune infrastructure nationale de recherche n'existe à l'interface entre les domaines sciences du système Terre et de l'environnement et Biologie-Santé sur les questions des risques toxicologiques et écotoxicologiques. L'élargissement de l'initiative RECOTOX, soutenue par AllEnvi, est à considérer, en regard des recherches nécessaires identifiées dans les plans nationaux en santé-environnement (Plan national santé-environnement ; Stratégie nationale sur les perturbateurs endocriniens ; Plan chlordécone ; Plan national de lutte contre l'antibiorésistance ; Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques…), au côté d'autres infrastructures à venir du domaine Biologie-Santé.

• **Économie de l'environnement :** aucune infrastructure ne traite de cet aspect. Une réflexion inter-alliances, AllEnvi et Athéna, élargie à Aviesan et Ancre, pourrait permettre d'avancer sur cette thématique, en particulier en considérant le prisme des transitions environnementales et énergétiques et la préservation de la santé humaine et des milieux (*One Health/Eco-Health*).

• **Dynamique territoriale :** les territoires sont au cœur de la transformation de nos sociétés. Il apparaît de ce fait indispensable de faire converger les travaux des différentes alliances afin d'accompagner, en renforçant des sites existants ou en en créant de nouveaux, les transitions territoriales en cours. De plus, il apparaît également indispensable que ces travaux intègrent des sites en dehors de l'espace européen car l'évolution de notre société relève aussi d'une échelle mondiale.

Recommandation 9

Mener une réflexion inter-alliances aux interfaces entre environnement, alimentation/nutrition, transition énergétique et santé dans son périmètre le plus large (*One Health/Eco-Health*), pour la construction éventuelle d'une ou plusieurs infrastructures de recherche d'ici 2025.

© Ozcar

3/ BESOINS DE DÉVELOPPEMENTS TECHNOLOGIQUES ET MÉTHODOLOGIQUES

La veille technologique sur les développements instrumentaux doit conduire à renforcer les liens entre les infrastructures et l'industrie. Concernant les verrous technologiques liés à l'innovation, quatre domaines nécessitent des développements instrumentaux :

• **Capteurs à bas coûts :** les capteurs à bas coûts pour les diverses observables sont une priorité. Le besoin se fait notamment ressentir pour les domaines océan ou surfaces continentales, avec également le besoin d'avoir une coordination du développement de ces capteurs. Le domaine atmosphère fait état de développements pour équiper notamment les milieux urbains (notamment pour la TGIR ICOS) et les domaines hydrosphère et biosphère pour documenter les hétérogénéités spatiales des processus (eLTER-France RZA et OZCAR).

• **Laboratoires mobiles sur véhicules terrestres ou aquatiques et engins aéroportés (drones, ballons) :** le besoin croissant de disposer de mesures réalisées *in situ*, à haute résolution et parfois dans des environnements peu accessibles, entraîne le développement de laboratoires mobiles. Ces laboratoires peuvent être embarqués sur des véhicules en milieux terrestres ou aquatiques ou sur des engins volants. Ils nécessitent également d'être adaptés ou développés. Concernant les ballons, une réflexion européenne a été initiée par le projet H2020 HEMERA. L'IR SAFIRE poursuit l'objectif stratégique de développer une offre « drones pour la recherche », et de développer une plus grande synergie et une plus grande intégration avions/ballons/drones, et différentes formes d'hybridation, avec tous les partenaires concernés (y compris privés), qui pourrait constituer un cadre idéal au niveau français pour faire émerger des innovations scientifiques, techniques et applicatives.

• **Nouveaux instruments de mesures et amélioration de la performance des instruments :** la recherche en sciences de l'environnement est dépendante de la capacité des instruments à fournir de nouvelles mesures physiques, biologiques et chimiques. Ces appareils peuvent être des prototypes de laboratoire ou des instruments commerciaux.

• **Nouvelles architectures de calculateurs et méthodes d'intelligence artificielle (IA) :** la modélisation dépend de façon critique des moyens de calcul. Les nouvelles architectures vont demander une interaction plus forte avec les disciplines travaillant sur l'informatique et l'algorithmique. Le développement de l'IA peut également fournir de nouvelles approches pour traiter les grandes masses de données issues des modèles et des ob-

servations, voire permettre de revoir la façon de représenter différentes parties du système Terre, notamment en intégrant dans ces approches la notion d'explicabilité des modèles produits par l'IA.

Les transferts des questions, savoir et savoir-faire transitent assez peu d'un domaine à l'autre. Un rapprochement entre différentes communautés (public/privé, disciplinaire, marin/terrestre, écosystèmes/modèles…), au travers d'actions communes, pourrait être favorisé. Par exemple, des transferts technologiques sur les conceptions et usages de capteurs marins pourraient très fortement bénéficier au domaine terrestre et permettre des changements d'échelle majeurs.

Au-delà de l'observation, les infrastructures de recherche peuvent contribuer de manière plus directe à la prévention des risques. Certains sites pourraient être adaptés pour développer des outils d'alerte (détection de signaux faibles ou précoces), comme c'est déjà le cas dans le domaine du risque volcanique, les tester et les implémenter via des méthodes pratiques dans des systèmes qui diminuent les risques, contribuent à la prise de décision, ou sont capables de fonctionner dans un environnement à risque.

Recommandation 10

Encourager les développements technologiques (capteurs à bas coût, laboratoires mobiles terrestres, aquatiques et aéroportés, instruments de mesures chimiques, physiques et biologiques, calculateurs…), et méthodologiques (intelligence artificielle, transferts de compétences entre communautés, échanges de pratiques entre modélisateurs).

4/ SYNERGIES ENTRE INFRASTRUCTURES ET DISPOSITIFS NATIONAUX D'OBSERVATION/ EXPÉRIMENTATION

Le constat est fait que les porteurs d'infrastructures ne se connaissent pas, ou peu, entre eux. Une meilleure synergie scientifique entre infrastructures et avec les parties prenantes implique qu'il y ait des lieux et des moments de rencontres (séminaires thématiques, journées scientifiques avec invitation d'autres infrastructures, réseaux métiers, catalogues de projets/contacts, échanges de bonnes pratiques, participation à des rendez-vous avec des partenaires socio-économiques et politiques, etc.) et une activité de réseau. La question qui se pose est la légitimité de la structure qui assurerait l'animation inter-infrastructures. Le groupe infrastructure de l'alliance AllEnvi assure une vision transversale des infrastructures entre les organismes membres de l'alliance pour le domaine sciences du système Terre et de l'environnement. Il peut également aider à une animation nationale entre infrastructures et en inter-alliances en organisant des événements, en complément de l'animation réalisée par le département infrastructure de recherche au ministère en charge de la recherche et de l'innovation.

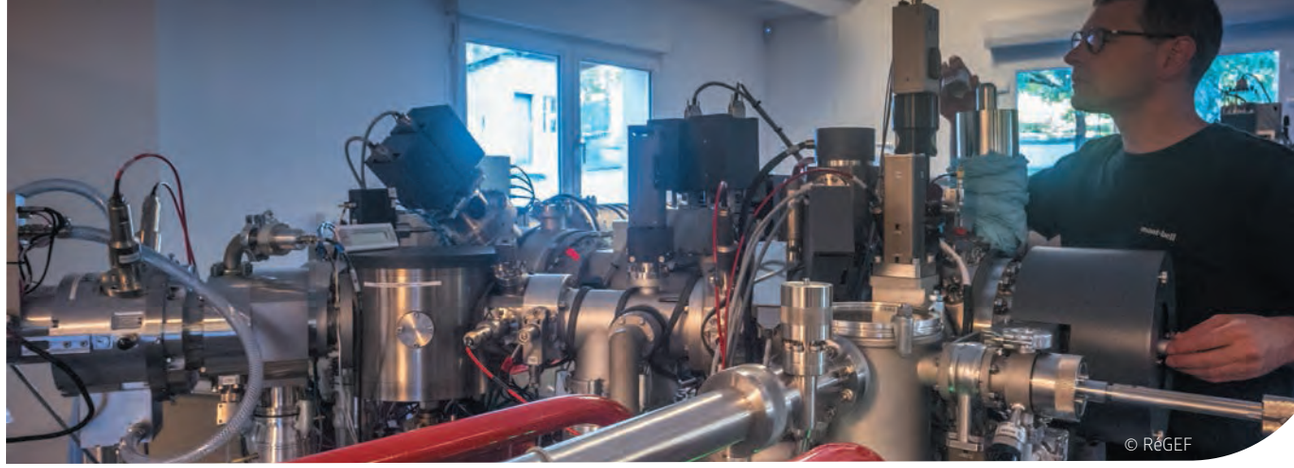
Comme indiqué plus haut, les transferts de questionnement, savoir et savoir-faire transitent assez peu d'un domaine à l'autre. Pour une meilleure synergie, il est primordial de renforcer la coopération, la coordination et l'interdisciplinarité, au travers par exemple de la mise en œuvre de différents projets de recherche autour d'un même objet ou d'un même outil, pour continuer à travailler sur les enjeux de recherche dans le cadre du changement global. L'interdisciplinarité peut également être abordée par le développement de services dans les pôles de données (DATA TERRA et PNDB) et par la mise en commun de données variées. Par exemple, pour les milieux urbains et péri-urbains, alors que 56% de l'humanité vit aujourd'hui dans ces environnements, aucune infrastructure nationale ne leur est dédiée. Actuellement, des données spécifiques sur l'eau, l'air, les sols ou la biodiversité sont acquises séparément dans les infrastructures d'observation/expérimentation sur l'atmosphère, l'hydrosphère ou les écosystèmes continentaux et les sols, qui alimentent les pôles de données. Un autre exemple est le travail entrepris sur les socio-écosystèmes qui associe des chercheurs relevant des sciences de la nature et des chercheurs des sciences humaines et sociales. La mise en synergie permettrait de faire évoluer efficacement les dispositifs par (1) l'acquisition de nouveaux paramètres dans un milieu déjà instrumenté ou étudié, ou (2) l'extension de l'acquisition d'un même paramètre à d'autres milieux. La co-localisation de dispositifs de mesures de plusieurs infrastructures sur un même site peut être envisagée en réponse à un besoin scientifique particulier.

Recommandation 11

Renforcer la coopération et la coordination entre infrastructures de manière transversale, au travers d'actions communes, par exemple pour traiter des questions liées aux grands cycles de la matière ou à des environnements particuliers comme les milieux urbains

Recommandation 12

Encourager l'interdisciplinarité par un rapprochement des communautés au travers d'actions communes.



5/ FORMATION ET NOUVELLES COMPÉTENCES

Le besoin en ressources humaines qualifiées pour assurer le fonctionnement des infrastructures est vital.

En ce qui concerne la formation supérieure, des interactions avec des écoles, des universités et IUT ou des filières par apprentissage seraient à développer avec l'accueil d'étudiants dans les infrastructures pour des visites ponctuelles, des stages de longue durée ou des écoles d'été. Signalons par exemple l'initiative du réseau des universités marines et de la FOF pour accueillir un plus grand nombre d'étudiants des formations marines au travers de campagnes de formation dédiées, de campagnes couplées enseignement-observation et de campagnes couplées enseignement-recherche (de type « Universités Flottantes[108] »). Le compagnonnage pourrait être proposé, par exemple, avec un système de formation de jeunes en inter-infrastructures. Par ailleurs, devant la difficulté de garder les compétences techniques, une réflexion sur l'utilisation de sous-traitance par des PME devrait être menée, par exemple pour réaliser des mesures ou des prélèvements réguliers.

Le recours croissant au numérique et au *big data* dans les infrastructures implique de nouveaux métiers, par exemple besoin en « data scientists », en ingénieurs formés aux nouvelles technologies du calcul haute performance… Ce nouveau champ d'activité pose la question à la fois de la place du numérique dans les infrastructures et aussi celle du profil de recrutement associé, avec le sujet de l'attractivité de ce type de poste. En corollaire, ceci conduit à se poser la question de la mutualisation de ce type d'activité avec des outils dédiés, voire la création de sociétés dédiées. Néanmoins, le contexte reste délicat en raison du manque relatif de compétences dans le monde académique pour le développement de services numériques au plan national. Ceci peut passer, par exemple, par la mise en place de cursus spécialisés pour les experts en sciences de l'information[109] qui pourront apporter leurs expertises aux scientifiques des différentes infrastructures mises en place.

Dans les universités, un lien formation/infrastructure/innovation peut être assuré par les FabLabs, structures qui mettent à disposition

108. L'Université Flottante est une opération récurrente d'embarquement d'étudiants à bord du navire Marion Dufresne de l'IPEV. Douze opérations de ce type ont eu lieu de 1997 à 2018 ; https://www-iuem.univ-brest.fr/master_sml/fr/international/universite_flottante

109. Comme le recommande B. Mons, Président de CODATA dans un article publié dans Nature https://www.nature.com/articles/d41586-020-00505-7

des moyens de prototypage et donnent du conseil pour la conception et la réalisation. Ces FabLabs pourraient être des tremplins pour des développements technologiques innovants pour l'environnement. Des « défis » pourraient être confiés aux étudiants ingénieurs dans ces FabLabs.

Recommandation 13

Favoriser l'accueil et la formation de personnels dans les infrastructures de recherche, notamment au travers d'un système d'écoles d'été, d'une mobilité des apprenants entre infrastructures (compagnonnage) pour un maintien et un développement des compétences.

6/ DONNÉES ET SERVICES : INTERFACES AVEC LE MONDE SOCIO-ÉCONOMIQUE, MODÉLISATION

Les infrastructures de recherche ont pour mission d'offrir des données et/ou un ensemble de services aux communautés, comme par exemple des accès à des instruments lourds de support logistique, à des sites ou à des produits élaborés à partir des données. Le terme de « services », utilisé dans cette partie, concerne les services construits à partir des données.

Besoin de mise en commun des données issues de différents domaines

Dans le domaine scientifique du système Terre et de l'environnement, l'approche sectorielle demeure encore aujourd'hui la norme en gestion des données environnementales. Si elle correspond aux attentes des responsables de systèmes d'observation, elle n'est pas pleinement satisfaisante car :

- Sur le plan fonctionnel, cette approche sectorielle rend difficile les études pluridisciplinaires concernant plusieurs compartiments de l'environnement, telles que les études sur le climat, les approches écosystémiques intégrées, les interactions océan/atmosphère, ou atmosphère/surfaces continentales… Les interfaces d'accès aux données proposées aux utilisateurs sont en effet nombreuses et, en règle générale, peu homogènes et utilisant des vocabulaires différents. En conséquence, la tâche d'intégration des données revient à l'équipe scientifique utilisatrice, ce qui provoque une difficulté d'usage importante.

- Sur le plan du développement et de l'opération des systèmes, cette approche sectorielle ne permet que peu de factorisation, quand bien même nombre de composants et de procédures techniques sont assez similaires :gestion des utilisateurs, description (métadonnées) et pérennisation des données, protocoles de diffusion de l'information géo-référencée…

Depuis 2016, la gestion des données et des services tend à se structurer en deux grands pôles de données, DATA TERRA pour le pôle de données et de services du système Terre et le PNDB pour le pôle de données de biodiversité. Cette structuration s'inscrit pleinement, en France, pour les données d'observation de la Terre, dans l'application des 4 principes FAIR : faciles à trouver (F), accessibles (A), interopérables (I) et réutilisables (R), en correspondance avec l'initiative Européenne EOSC. La structuration récente de ces pôles se traduit par une forte évolution de leurs offres, tant du point de vue des périmètres que des gouvernances ou des services apportés. Des synergies

opérationnelles (interopérabilité, catalogues de métadonnées, accès aux données, thesaurus, catalogues des variables essentielles, catalogues des sites, accès aux services) sont souhaitées. Dans ce cas, les pôles de données développent des outils et des services qui prennent appui sur les données de différentes sources.

A terme, un rapprochement de DATA TERRA et du PNDB est souhaitable car les interfaces entre géosphère et biosphère sont au cœur d'études actuelles (climat ou milieux urbains par exemple).

Recommandation 14

Consolider les deux pôles de données (DATA TERRA et PNDB), veiller à leur insertion dans le tissu des mésocentres régionaux et nationaux et favoriser leur rapprochement pour l'étude des interfaces géosphère-biosphère.

Statut de la donnée et articulation entre la recherche scientifique et le monde socio-économique

Les questions liées au statut légal, sociétal et scientifique des bases de données sont récurrentes. Ces questions se posent dans l'articulation nécessaire à trouver entre recherche publique et secteur privé. Sur ce second aspect, la valeur marchande explicite des bases de données et les difficultés à les valoriser pleinement, mais aussi le manque d'un cadre réglementaire stabilisé, peuvent induire des situations de « moissonnage » systématique des produits de la recherche publique par le secteur privé (« science ouverte » ne signifiant pas automatiquement « science gratuite »). Un parallèle doit être fait sur ces questions entre la valorisation/gestion des bases de données et celles des collections d'échantillons.

Concernant la reconnaissance et la prise en compte par la sphère publique des bases de données produites par les infrastructures de recherche, un objectif pourrait être une accentuation de la production de produits référencés. Ceci impliquerait néanmoins d'une part, la mobilisation de la communauté scientifique dans ce sens, mais surtout, d'autre part, une commande publique plus explicite. Il est toutefois important de garder à l'esprit que l'établissement de bases de données de référence relève souvent, domaine par domaine, des missions spécifiques des organismes, ce qui n'exclut pas la possibilité de besoins nouveaux et transversaux, en particulier dans le contexte de la transition écologique.

Recommandation 15

Conduire une réflexion nationale sur le modèle économique de la donnée de recherche dans le domaine sciences du système Terre et de l'environnement.

Les services d'expertise et d'appui aux politiques publiques

En parallèle aux missions liées strictement aux données, les infrastructures sont, de manière croissante, interrogées sur leur capacité à fournir des « services » non seulement à la communauté scientifique (acquisition, mise en forme et mise à disposition des données), mais plus largement à la société en général (secteur privé, État, collectivités, associations, sphère éducative…), en prise avec les grands enjeux environnementaux.

L'objectif d'un investissement potentiel de la communauté scientifique dans l'élaboration de « produits » directement utilisables par la société ramène immédiatement au débat sur la distinction et l'articulation nécessaires entre la recherche et l'opérationnel. Si les conceptions ont très largement évolué sur ce point durant la dernière décennie, sous la pression des urgences environnementales, imposant au monde académique de sortir d'une position initiale d'étanchéité rigoureuse entre les « Observatoires de Recherche » et les responsables civils, il n'en reste pas moins que les questions du type « C'est à qui de le faire ? » et « Qui paye les services ? » restent pragmatiquement très présentes. Une analyse précise, domaine par domaine, est sans aucun doute une des tâches urgentes à entreprendre.

La connaissance, la prévention et la réduction des risques pourraient bénéficier d'un accès plus transversal à l'ensemble des données, qu'elles soient issues des dispositifs de recherche ou de l'observation en l'appui aux politiques publiques. Cette transversalité pourrait être améliorée à travers des services mis en place dans les infrastructures de recherche et par une implication plus grande des scientifiques dans les prises de décision dites politiques.

A titre d'exemple, l'initiative SCO (Space Climate Observatory) qui vise à répondre expressément aux besoins des territoires permet d'offrir, à partir de l'utilisation combinée de données spatiales, environnementales ou encore socio-économiques, des produits tels que des analyses prospectives d'impact du changement climatique pour la mise en œuvre de politiques adaptatives. Les projets labellisés s'appuient sur des travaux de recherche dont ils constituent l'étape de valorisation opérationnelle.

Recommandation 16

Conduire une analyse précise, domaine par domaine, des modalités de production de services, d'expertises, d'appui aux politiques publiques et de contribution aux prises de décision.

Recommandation 17

Développer les interactions avec les sciences humaines et socialesafin d'enrichir les données et/ou de mettre celles-ci plus au service de thématiques d'intérêt sociétal.

7/ MOYENS HUMAINS ET FINANCIERS POUR LE FONCTIONNEMENT, LA JOUVENCE ET DE NOUVEAUX ÉQUIPEMENTS DES INFRASTRUCTURES DE RECHERCHE

Financement

Dimensionner en conséquence les moyens nationaux, financiers et humains, est crucial pour que la France maintienne sa capacité logistique, ses collections et ses systèmes d'observation et d'expérimentation à haut niveau et garde sa place dans la stratégie européenne et internationale dans le domaine des sciences du système Terre et de l'environnement. La fin des premiers programmes d'investissement d'avenir (PIA-1 & 2) concernant les équipements de recherche (projets EQUIPEX) va fragiliser les infrastructures qui se sont construites sur cet outil. L'appel d'offre en cours (EQUIPEX + du PIA-3) n'est pas suffisamment doté pour répondre à l'ensemble des besoins identifiés. Une réflexion inter-organismes et interministérielle s'avère nécessaire sur la suite du soutien que peut apporter l'État aux grands équipements de recherche du domaine. Rappelons que la nécessité et le caractère stratégique du renouvellement des très gros équipements a été souligné pour les avions, les bateaux et les calculateurs (Recommandation n°3). Concernant le numérique, des budgets conséquents seront nécessaires pour l'achat et le fonctionnement des équipements. La demande pour le stockage et le traitement de données par les centres de calcul nationaux comme GENCI ou CINES, et plus largement la concentration des moyens dans des centres régionaux spécialisés pourraient faciliter la montée en puissance de ces activités si les ressources humaines et financières restent suffisantes. Enfin, les équipes exploitant les données produites par les infrastructures peinent souvent à réunir les moyens financiers et humains nécessaires. Alors que le financement de l'exploitation scientifique est associé au financement des infrastructures dans de nombreux pays, ce n'est pas le cas en France ce qui pénalise nos équipes, et particulièrement celles utilisant les infrastructures internationales les plus compétitives. Une meilleure coordination des appels à projets pourrait amoindrir ce handicap.

Recommandation 18

Renforcer les moyens mobilisés (fonctionnement, équipement et ressources humaines), pour que les TGIR/IR gardent leur excellence et assurent leurs missions au service de la recherche.

Recommandation 19

Assurer une mise en cohérence entre les calendriers des appels à projets de l'ANR et ceux gérant l'accès aux gros moyens logistiques (bateaux, avions, bases polaires, plateformes…).

Moyens humains

Les ressources humaines impliquées dans les infrastructures sont très variées :

- Chercheurs et enseignants-chercheurs. Parmi ces derniers, le statut du corps d'État du CNAP[110], personnels enseignants-chercheurs assimilés, notamment ceux relevant des sections Terre Interne et Surfaces Continentales-Océan-Atmosphère, est une spécificité du domaine sciences du système Terre et de l'environnement. Ce corps assure statutairement des missions nationales d'observation.
- Ingénieurs et techniciens d'organismes de recherche ou d'établissements d'enseignement supérieur et de recherche.

Ces personnels assurent la production, l'archivage, la gestion des données d'observation et d'expérimentation à long terme ou le fonctionnement des infrastructures logistiques sans nécessairement une reconnaissance de ces activités au service des communautés. Devant la montée en puissance des besoins et des livrables des infrastructures du domaine sciences du système Terre et de l'environnement depuis une dizaine d'années, il apparaît aujourd'hui primordial que l'ensemble des activités réalisées dans les infrastructures de recherche soit reconnu dans la carrière des personnels, qu'ils relèvent du corps des CNAP ou non. De même, la difficulté à mesurer les impacts d'une infrastructure de recherche, au-delà du champ académique proche, met en lumière le besoin d'un effort urgent d'établissement de critères et d'indicateurs partagés. Ces derniers doivent se partager entre l'activité des personnels et celle de l'infrastructure en elle-même.

Recommandation 20

Améliorer et homogénéiser les méthodes de suivi des activités et les impacts des infrastructures dans le domaine sciences du système Terre et de l'environnement

Recommandation 21

Reconnaître les activités de tous les personnels impliqués dans les infrastructures de recherche nationales.

110. CNAP : Conseil national des astronomes et physiciens.

En conclusion, 21 recommandations ont été identifiées, dans différents secteurs (logistique, financier, RH, technique) pour appuyer et soutenir l'ensemble des infrastructures relevant du domaine Sciences du système Terre et de l'environnement.

Comme en témoigne ce rapport, les infrastructures de recherche sont essentielles pour conduire les recherches liées aux grands enjeux du XXIème siècle auxquels réfléchit l'alliance AllEnvi (adaptation et atténuation face au changement climatique, biodiversité; territoires en transition; transitions alimentaire; énergétique et écologique : durabilité des ressources, risques naturels et environnementaux et villes durables).
Maintenir à un haut niveau ces outils, les ancrer dans le territoire national et européen, porter de nouvelles candidatures pour paver au mieux les domaines nécessaires pour les recherches restent un objectif ambitieux et collectif.

Un élément très positif est l'engagement et la capacité d'un certain nombre d'organismes de recherche et d'universités à gérer des infrastructures sur le long terme, à l'échelle nationale, européenne ou internationale. Ce sont des acteurs qui pourront servir de catalyseurs pour l'ensemble de la communauté à condition que soient mis en place les outils *ad hoc* pour ce type de structure, conférant ainsi à la France un rôle incontournable dans le paysage européen.

Analyse, recommandations et évolution stratégique du dispositif national

© Lebourgeois

Glossaire

AISBL : Association Internationale Sans But Lucratif (Belgique)

ANDRA : Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

BIPM : Bureau International des Poids et Mesures

BLD : Ballons Légers Dilatables

BPCL : Ballons Pressurisés de Couche Limite

BPS : Ballons Pressurisés Stratosphériques

BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières

BSO : Ballons Stratosphériques Ouverts

BVRE : Bassins Versants Représentatifs et Expérimentaux

CDB : Convention sur la diversité biologique

CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

CEPMMT : Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme

Cerfacs : Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique

CNAP : Conseil National des Astronomes et Physiciens

CNES : Centre National d'Études Spatiales

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

COI : Commission Océanique Intergouvernementale

CRISPR : *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*

CRB : Centre de Ressources Biologiques

DGA : Direction Générale de l'Armement

DOI : *Digital Object Identifier*

EFESE : Évaluation Française des Écosystèmes et Services Ecosystémiques

EOOS : *European Ocean Observing System*

EOSC : *European Open Science Cloud*

EPA : Enquête permanente sur les avalanches

ERIC : *European Research Infrastructure Consortium* (entité juridique de droit européen)

ESA : *European Space Agency*

ESFRI : E*uropean Strategy Forum on Research Infrastructures*

FAIR : *Findable, Accessible, Interoperable, Reusable* (Trouvable, Accessible, Interopérable, Réutilisable)

GBIF : *Global Biodiversity Information Facility*

GEO : *Group on Earth Observations*

GEOSS : *Global Earth Observation System of Systems*

GEOBON : *Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network*

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat

GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique

I3: Initiative Intégrée d'Infrastructure (programme cadre européen)

IBiSA : Infrastructure Nationale en Biologie Santé et Agronomie

ICP-MS : *Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry*

Ifremer : Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

IGCS : Inventaire, Gestion, Conservation des Sols

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

INEE : Institut Écologie et Environnement (CNRS)

INFRAIA : *Integrating and opening research infrastructures*

INPN : Inventaire National du Patrimoine Naturel

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

INSU : Institut National des Sciences de l'Univers (CNRS)

IPBES : *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*

IPEV : Institut polaire français Paul-Émile Victor

IPGP : Institut de Physique du Globe de Paris

IR : Infrastructure de Recherche

IRD : Institut de recherche pour le développement

LNE : Laboratoire national de métrologie et d'essais

MISTRALS : *Mediterranean Integrated STudies at Regional And Local Scales*

MNHN : Muséum National d'Histoire Naturelle

OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale

ODD : Objectifs de Développement Durable

OFB : Office Français de la Biodiversité

OI : Organisation Internationale

OMM : Organisation météorologique mondiale

ONB : observatoire National de la biodiversité

ONF : Office national des forêts

OPE : Observatoire Pérenne de l'Environnement (ANDRA)

ORE : Observatoire de Recherche en Environnement

OSU : Observatoires des Sciences de l'Univers

PIA : Programme d'investissements d'avenir

PNT : Prévision Numérique du Temps

SARM : Service d'Analyse des Roches et des Minéraux

SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

SINP : Système d'Information sur la Nature et les Paysages

SNO : Services Nationaux d'Observation (CNRS)

SO : Services d'Observation

SOERE : Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement

TAAF : Terres australes et antarctiques françaises

TGIR : Très Grande Infrastructure de Recherche

TICE : Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires

TRL : *Technology Readiness Level*

UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

WCRP : W*orld Climate Research Programme*

Membres fondateurs

Membres associées

Les infrastructures de recherche sont des outils à la pointe des connaissances scientifiques et technologiques essentiels pour conduire les recherches liées aux grands enjeux du XXIème siècle sur lesquels l'Alliance nationale de recherche pour l'environnement (AllEnvi) se positionne. Maintenir à un haut niveau ces outils, les ancrer dans le paysage national et européen, en mutualiser certains ou porter de nouvelles candidatures pour répondre aux enjeux de recherche dans le domaine des sciences du système Terre et de l'environnement restent un objectif ambitieux et collectif.

Les membres d'AllEnvi se mobilisent avec l'ensemble de la communauté scientifique pour favoriser les synergies et assurer la durabilité des infrastructures sur le long terme, à l'échelle nationale, européenne ou internationale, conférant ainsi à la France un rôle incontournable dans le paysage européen.

Ce document, préparé par le groupe transversal « Infrastructures, systèmes d'observation, services d'information environnementale et climatique » de l'alliance, présente, par grands milieux naturels, les infrastructures de recherche du domaine au niveau national (la plupart inscrites sur la feuille de route nationale des infrastructures de recherche) ou européen (essentiellement inscrite sur la roadmap ESFRI). Il analyse la manière dont elles permettent d'aborder les enjeux relatifs aux recherches en sciences de l'environnement et présente des propositions pour le futur du dispositif.

AllEnvi

Alliance nationale de recherche pour l'Environnement