



HAL
open science

Observation à distance

Thomas Houet, Yan Ropert-Coudert, Laurent Longuevergne

► **To cite this version:**

Thomas Houet, Yan Ropert-Coudert, Laurent Longuevergne. Observation à distance. Prospectives
CNRS Ecologie et Environnement, pp.175-188, 2023. hal-04632722

HAL Id: hal-04632722

<https://hal.science/hal-04632722>

Submitted on 3 Jul 2024

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

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

Observation à distance

Auteurs : Thomas Houet (LETG), Yan Ropert-Coudert (CEBC), Laurent Longuevergne (Géosciences Rennes)

3 PRIORITÉS SCIENTIFIQUES À ABORDER D'ICI 2030

- ▶ Inciter et renforcer des systèmes d'observation à long-terme en mobilisant des modalités de captation complémentaires
- ▶ Fédérer et structurer l'observation à distance (développement instrumental, acquisition et traitement...) des systèmes socio-environnementaux
- ▶ Développer une observation nécessaire et parcimonieuse : nécessité d'un compromis entre densification de la résolution, données pertinentes et explorations scientifiques

Introduction

La captation de données dans le domaine de l'écologie et de l'environnement, mais également en sciences humaines et sociales ou en géosciences, représente un pré-requis et un enjeu de recherche considérable. En effet, un très grand nombre d'applications et de disciplines repose sur la captation de données : la climatologie, la caractérisation et le suivi de la biodiversité et des milieux terrestres ou aquatiques dans lesquels elle évolue, la bio-géochimie de l'eau, de l'air ou encore des sols par exemple. Cette captation de données, notamment à distance, repose sur une instrumentation autonome et/ou contrôlée à distance, mais ne nécessitant plus la présence régulière des scientifiques. L'accessibilité de certains terrains d'étude, et les conditions qui y règnent, peuvent être difficiles, voire dangereuses pour les scientifiques (volcans, zones inondables ou polluées, zones arctiques...).

Cette instrumentation est à la fois un objet de recherche et un moyen pour alimenter les questions scientifiques en données pertinentes. La recherche procède en effet souvent d'observations opportunistes ou dans le cadre d'observatoires, et l'instrumentation permet de multiplier notre capacité d'observation, de quantifier des phénomènes biophysiques ou sociaux, au-delà de nos cinq sens, de couvrir des domaines souvent inaccessibles à de multiples échelles spatiales et temporelles. Les appels d'offres nationaux et internationaux mobilisés au cours de la dernière décennie, au travers des programmes d'investissements d'avenir (Equipex...) ou autres projets d'innovation technologique, en témoignent.

En écologie et environnement, trois principales méthodes de captation de données sont mobilisées : le *bio-logging*, la télédétection et l'instrumentation *in situ*. Les deux premiers reposent sur une instrumentation embarquée sur des vecteurs vivants (animaux via le *bio-logging* et la bio-téléométrie) ou technologiques (nano satellite, drone aérien ou sous-marin, ballon, *rover* ou robot...), alors que le dernier concerne une instrumentation fixe, ponctuelle et autonome permettant l'acquisition à haute fréquence de

variables bio-physiques, souvent incluse au sein d'un réseau de capteurs hétérogènes (station météorologique, capteurs de qualité de l'eau ou de l'air, caméra observant une portion de l'espace ou détectant le passage d'animaux...). Une quatrième source de données, non abordée durant l'atelier, peut être considérée au travers des contributions participatives de la société à la recherche (smartphone, inventaires, questionnaires...). Cette observation « grand public » permet de démultiplier les capacités d'observation, de capter, densifier, en sus de données biophysiques, un grand nombre de « points de vue » (perception sociale, subjectivité, relations sociales, jeux d'acteurs...), mais également d'articuler les connaissances indispensables pour évaluer la capacité adaptative de la société aux changements globaux.

L'atelier « Observation à distance » des prospectives de CNRS Écologie & Environnement a regroupé 36 participants. Il s'est tenu autour de trois temps forts. Le premier a consisté en un état des lieux, fondé sur une présentation rapide de chacune des contributions soumises à l'atelier d'une part, et d'un questionnaire en ligne interactif. Le second temps consistait à travailler en sous-ateliers portant chacun sur un des trois principaux modes de captation évoqués (*bio-logging*, télédétection et instrumentation *in situ*). Le dernier temps était une restitution des travaux des sous-groupes en plénière et d'échanges avec l'ensemble des participants. La méthode a consisté à ne pas parler, dans la mesure du possible, de ses propres enjeux, mais bien d'adopter une attitude critique. L'objectif était ainsi de pouvoir récolter le matériau nécessaire pour réaliser une synthèse prospective portant sur les enjeux et les verrous actuels, et sur les pistes futures concernant l'observation à distance. Cette synthèse est structurée comme suit : la première partie résume les principales contributions et la composition de l'atelier. La seconde partie synthétise les discussions concernant les verrous, enjeux et perspectives pour le *bio-logging*, la télédétection et l'instrumentation *in situ*. La troisième partie discute ces éléments dans une perspective plus systémique.

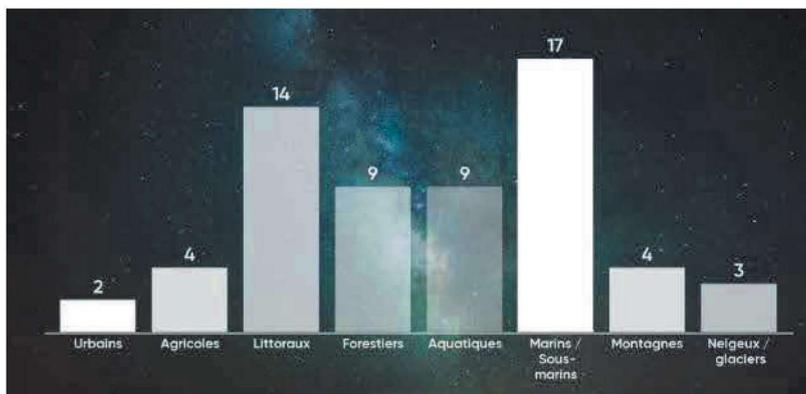


Figure 1. Répartition des biomes étudiés par les 32 répondants au questionnaire de l'atelier « Observation à distance ».

L'atelier était composé de 36 personnes, dont 32 répondants au questionnaire, parmi lesquelles 19 hommes, 12 femmes et 1 qui préfère ne pas répondre. La majorité d'entre elles sont chercheuses et chercheurs ou équivalent (18), 9 sont IT, 3 sont de jeunes chercheuses et chercheurs (Doc/post-doc), et 2 « autres ». L'ensemble des nouvelles régions étaient représentées par 1 ou plusieurs laboratoires de recherche, avec une légère surreprésentation de la partie rochelaise. L'ensemble des biomes concernés par cette observation à distance sont représentés avec une légère sous-représentation des milieux monta-

gnards, neigeux/glaciaires, agricoles et urbains et une surreprésentation du milieu marin probablement en lien avec le grand nombre de personnels rochelais sur place (Figure 1). Les nuages de mots générés concernant les domaines d'applications et les variables suivies étant très éclatés, sans réel dénominateur commun, témoignent de l'extrême variabilité et interdisciplinarité de l'observation à distance. Enfin sur 32 participants, 16 personnes se sont déclarées comme ayant un niveau de compétence moyen à très expérimenté en instrumentation *in situ*, 12 en télédétection et 6 en *bio-logging*.

Synthèse des contributions

Au total, 13 contributions ont été reçues en amont de cet atelier (3 « *bio-logging* », 5 « télédétection », 5 « *in-situ* »). D'une manière générale, les travaux scientifiques mettent en avant la capacité des développements instrumentaux à réexplorer le fonctionnement et les trajectoires des socio-écosystèmes sous un angle nouveau, notamment les questions associées aux relations biotiques-abiotiques et aux cascades d'échelles. Les travaux de Levin (1992) ont démontré que les processus écologiques agissent à diverses échelles spatiales et temporelles, et génèrent des motifs à des échelles différentes.

Dans certains cas, les motifs doivent être compris comme émergeant des comportements collectifs de grands ensembles d'unités à plus petite échelle. Dans d'autres cas, les motifs sont imposés par des contraintes à plus grande échelle. La clé de la prédiction et de la compréhension réside dans l'élucidation des mécanismes qui sous-tendent les motifs observés.

Les outils présentés permettent de raffiner les échelles de sensibilité sur des domaines explorés de plus en plus larges - dans le temps pour l'instrumentation *in situ*, ou dans l'espace pour

les observations spatialisées - et de définir la manière dont le vivant « navigue » dans ces habitats. Les outils permettent de faire émerger des structures en patchwork à petite échelle et redéfinissent le rôle fondamental de l'hétérogénéité dans le fonctionnement global des systèmes observés (ex. les habitats mobiles et éphémères associés aux fronts océaniques, ou bien les zones humides). Les capteurs permettent une auscultation quasi continue des systèmes écologiques, en économisant la présence humaine et apportant des informations critiques sur les dynamiques transitoires et l'impact des stress abiotiques sur le vivant (ex. la cognition).

Les questions associées au traitement des données sont également soulevées. Au-delà des questions de FAIRisation traitées dans un autre atelier, il s'agit de faire émerger de nouveaux

outils à l'interface entre producteurs et utilisateurs, permettant d'extraire les informations pertinentes dans des quantités de plus en plus importantes de données. La numérisation des collections est un exemple significatif et pose à la fois la question de la pérennisation des spécimens numériques et de la définition d'outils pour s'immerger et identifier les informations pertinentes au sein des quantités astronomiques de données générées.

Enfin, les contributions mettent en avant l'effort de structuration transverse des communautés autour des développements de l'instrumentation environnementale *in natura*, qui émanent des chercheurs (réseau métier Drone & Cap), mais également du CNRS par la nouvelle Commission spécialisée instrumentation innovante et transverse (CSIIT) et de la Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (MITI).

Bio-logging

État des lieux et enjeux

Le *bio-logging* est une approche qui s'est énormément « démocratisée » au cours de ces deux dernières décennies. Elle a été appliquée à un nombre de taxons croissant, mais demeure essentiellement confinée aux animaux de masse corporelle suffisante pour accommoder les appareils embarqués sans que cela ne nuise à leur santé et/ou ne modifie leur comportement. Les taxons dits « invisibles » (insectes, petits poissons) et leurs interactions ne peuvent pour l'instant être appréhendés par le *bio-logging*. Dans ces conditions, la possibilité d'obtenir des jeux de données sur l'ensemble des échelons d'un écosystème, notamment les échelons intermédiaires, représente un enjeu de taille, surtout si cela est réalisé de manière dynamique (spatialement et temporellement). Il serait en effet essentiel de pouvoir étudier les interactions en temps quasi-réel entre des individus au moyen de réseaux de *bio-loggers* embarqués sur les animaux comme, par exemple, au moyen de *loggers* de proximité (Prange *et al.*, 2011). Ces réseaux pourraient intégrer en sus des vecteurs mobiles que sont les animaux, des vec-

teurs fixes comme les végétaux et ainsi s'intégrer dans des systèmes fixes d'instrumentation *in situ* pour obtenir une vue plus holistique des écosystèmes.

La démocratisation du *bio-logging* a aussi eu comme effet d'accroître de manière exponentielle la quantité et le type de données que les *bio-loggers* délivrent. L'enjeu à ce niveau est de trouver les sites de dépôts qui permettraient d'accueillir cette masse de données afin qu'elle soit mise à disposition en libre accès et à large échelle. Si plusieurs initiatives existent pour les données de localisation (ex. GBIF*, OBIS* ou *Movbank*), il n'y a que peu de sites qui permettent d'accueillir et de gérer les données dites « lourdes » telles que les données d'accélérométrie, d'acoustique ou encore les données issues de *video-loggers*.

Verrous

Certaines espèces sont de taille encore trop réduite pour être équipées avec des *bio-loggers*, d'autres ont des modes de vie trop cryptiques pour être capturées plusieurs fois et les données embarquées deviennent ainsi irrécupérables. Ces difficultés conduisent à une hétérogénéisation forte de notre capacité à étudier certains taxons par rapport à d'autres selon une approche individu-centrée. Elles expliquent également la quasi-impossibilité d'appréhender le fonctionnement des écosystèmes via le *bio-logging* puisque nous ne pouvons examiner chaque niveau trophique selon la même méthodologie, et encore moins investiguer les interactions et les flux, par exemple d'énergie, entre individus sur l'ensemble (ou *a minima* les principaux)

Solutions et enjeux futurs

L'un des premiers chantiers pour pousser la démocratisation du *bio-logging* et espérer répondre aux questions susmentionnées serait d'arriver à une forme de standardisation des *bio-loggers*, c'est-à-dire à une harmonisation technologique avec la définition de format et de types de mesures qui pourraient être partagés entre différentes équipes. Cette standardisation des appareils iraient ainsi de pair avec une standardisation des données qui impliquerait nécessairement une standardisation dans leurs modes de stockage et surtout de partage. Pratiquement, il faudrait donc faciliter, ou en tout cas, mieux utiliser et catalyser les réseaux métiers existants afin que les communautés utilisatrices du *bio-logging* - mais aussi des autres systèmes d'instrumentation - échangent plus/mieux. Le rôle des réseaux métiers serait de proposer des formations à une bonne utilisation du *bio-logging* (respect de l'animal utilisé comme objet d'études ou « auxiliaires de la recherche », compréhension des données et de leurs valeurs intrinsèques, compréhension aussi des limitations inhérentes aux systèmes de mesure...).

À titre d'exemples, le groupe « *Drones & Cap* » ou la Cellule faune sauvage de CNRS Écologie & Environnement pourraient servir de lieux pour mettre en œuvre de telles formations. Alternativement, il pourrait être intéressant de créer une branche nationale de la société internationale du *bio-logging* (<https://www.bio-logging.net/>).

des taxons constituant les chaînes alimentaires. D'un point de vue économique, il existe encore peu de compagnies produisant des outils du *bio-logging* en France. La difficulté principale réside dans la transition entre la création d'appareils en R&D dans les laboratoires à une production en masse dans une start-up. Malgré des procédures mises en place aux niveaux institutionnels pour assister les laboratoires dans la démarche de création de start-ups, le processus a du mal à s'installer dans le cas du *bio-logging*. Le marché est-il trop spécifique ou les développeurs du *bio-logging* (souvent des biologistes ou personnes avec une fibre biologiste) sont-ils moins motivés à évoluer vers une professionnalisation de leurs métiers ?

Outre une meilleure communication entre utilisateurs, de telles plateformes pourraient se voir confier le rôle de « médiateurs » entre les scientifiques et le grand public. En effet, un des enjeux majeurs autour du *bio-logging* consiste à mieux sensibiliser la société sur nos pratiques. Il faut en effet souvent démontrer et convaincre le grand public que nos activités scientifiques ne se font pas au détriment de la faune étudiée. En *bio-logging*, l'utilisation des animaux à des fins scientifiques a très souvent un aspect bénéfique pour la conservation de l'animal, même si de nombreuses études n'ont pas nécessairement cette finalité et reste des études purement fondamentales. Il faut ainsi mettre en avant les études visant à diminuer l'impact du *bio-logging* sur les animaux et éviter de colporter l'image de « cowboy du *bio-logging* qui tague tout ce qui bouge ». Une meilleure communication des publications d'impact et de solutions potentielles pour diminuer cet impact, ainsi qu'un meilleur partage des bonnes pratiques devraient conduire à une meilleure compréhension par le public de nos approches.

Si la standardisation des données et capteurs du *bio-logging* est souhaitée et souhaitable, l'exploration, la découverte, les essais de nouveaux types de *bio-loggers*, mesurant de nouveaux paramètres avec de nouvelles combinaisons - en un mot l'innovation - reste vitale. Sans innovation dans les outils de mesure, la recherche se

sclérose car, très vite, les outils ne seront plus capables d'aider les chercheurs à répondre aux nouvelles questions qui s'imposent à eux.

Le Graal est évidemment d'arriver à une génération de *bio-loggers* qui n'aient aucun ou quasiment aucun impact sur le sujet qui le porte. Il est question ici de taille, de profils de l'appareil mais aussi de systèmes de fixation sur ou dans le corps de l'individu, en gardant à l'esprit que la capture pour équipement/déséquipement entraîne également un impact et qu'il faudra donc travailler sur de nouvelles méthodologies pour que les approches de capture et les temps de contention soient optimums. Ces *bio-loggers* optimisés pourraient se concentrer sur la mesure de paramètres physiologiques « fins et complexes », c'est-à-dire des paramètres qui traduisent une réponse rapide, pertinente, et intégrative de l'organisme à des *stimuli* environnementaux qui peuvent être des paramètres physiques, chimiques, ou biologiques. La capacité à transmettre en temps réel la mesure d'un tel changement survenant au niveau de la physiologie de l'individu ouvrirait de nombreuses avenues de recherche. Imaginons ainsi une mesure sanguine du taux de corticostérone, analysée de manière

dynamique, qui informerait les rangers d'un parc de l'arrivée d'un braconnier ; ou bien de capteurs de concentration en polluants chimiques pour mesurer l'exposition des individus à la pollution en temps réel. En poussant plus loin, ces *bio-loggers* pourraient même mesurer l'ADN environnemental et ainsi effectuer des échantillonnages biologiques du milieu. L'apparition de la technologie MinION (<https://nanoporetech.com/products/minion>) laisse présager de la réalisation de tels rêves dans un futur relativement proche. Ainsi, nous pouvons envisager être en capacité de mesurer des paramètres génotypiques et phénotypiques en lien avec les conditions environnementales et à fine résolution spatiale depuis des *bio-loggers*.

En généralisant l'utilisation des *bio-loggers*, en multipliant leurs déploiements sur différents taxons au sein d'un écosystème, il deviendrait possible de mesurer, et éventuellement gérer en temps réel, le fonctionnement des écosystèmes, surtout si les approches *bio-logging* sont couplées avec celles évoqués dans ce document (télé-détection et mesures *in situ*). En parallèle de la domotique apparaît alors l'« Animalotique » !

Télé-détection

État des lieux et enjeux

La télé-détection bénéficie de plus de 30 ans d'avancées dans le domaine satellitaire pour proposer aujourd'hui des constellations de satellites d'observation de la Terre, une grande variété de données (dans les domaines passif et actif), ayant déjà soulevé les enjeux du *Big Data* depuis plusieurs années. Plus récemment, l'essor des drones, notamment aériens, via des offres commerciales standardisées, a permis de revisiter certains challenges liés à la détection de petites portions de surfaces terrestres grâce aux résolutions centimétriques offertes par ces vecteurs aériens. Cet essor ne s'est pas limité au domaine aérien, mais également aux domaines maritime, sous-marin, souterrain... Si l'un des principaux enjeux du satellitaire est aujourd'hui

de fournir de produits finis, aux méthodes éprouvées et démocratisées, à destination de la recherche et de l'action publique, la télé-détection par drone fait encore face à un certain nombre d'enjeux. Par exemple, force est de constater que la démocratisation rapide des drones a conduit à une pratique dominante reposant sur l'utilisation d'offres « clés en main », avec une confiance aveugle dans les capteurs. Aujourd'hui, de nombreuses études scientifiques en écologie et environnement, ou en géosciences, remettent en cause la qualité des mesures et appellent à une évaluation des capteurs. De plus, la montée en compétence des utilisateurs en sciences amène à une recherche de nouveaux capteurs et/ou modes de captation.

Dans le même temps, la grande flexibilité d'acquisition offerte par les drones amène à deux évolutions majeures des pratiques en télédétection. Tout d'abord, on constate un changement de paradigme passant d'une exploitation et adaptation des méthodes aux images satellitaires disponibles (date et heure fixes d'acquisition) vers une adaptation des protocoles d'acquisition (horaire, jour/nuit, répétitivité temporelle) pour détecter et caractériser les processus (socio)écologiques (usages...) ou biogéochimiques. Ensuite, cela engendre une évolution des données produites, tant dans leur dimension horizontale (résolution spatiale...) que verticale (profils atmosphériques...), permettant de passer d'un état de surface (une occupation du sol, détection d'espèces), à des paramètres biophysiques (taux de chlorophylle...) ou encore à des traits fonctionnels (hauteur, densité foliaire), qui permettent de définir des indicateurs clefs comme les EBV (*Essential Biodiversity Variables* - Pereira et al., 2013).

Verrous

La structuration actuelle du CNRS ne permet malheureusement pas d'avoir une vision holistique des forces et moyens en présence, dont les demandes de moyens relèvent d'initiatives trop locales (redondances de matériels à l'échelle d'UMRs, entretien non pérenne, dispersion des ressources). Au-delà de l'effet de mode des drones aériens, il y a une faible prise en compte de la pérennisation des matériels et des compétences malgré un accompagnement réglementaire efficace et proactif de la DIRSU* Drone. Par ailleurs, si le domaine aérien est désormais plutôt bien circonscrit réglementairement (voire trop), ce n'est pas encore le cas pour les autres domaines (marin, sous-marin...).

Par ailleurs, à notre connaissance, il n'existe aucune solution permettant une centralisation d'une telle volumétrie de données *raster*, une mise en commun (interopérabilité) des données

Aujourd'hui, le CNRS est la plus grosse société de drones aériens en France, avec 160 télépilotes approuvés dont 134 opérationnels, 223 drones répertoriés dont 180 opérationnels, et près de 1110 heures de vol entre octobre 2021 et octobre 2022. L'évolution inhérente des types de données produites par drone et de leurs caractéristiques (résolutions spatiales, temporelle, spectrale...) et la volumétrie générée soulèvent de nouveaux défis de visibilisation de celles-ci (FAIRisation), mais également des ressources disponibles et mobilisables. Enfin, les drones soulèvent l'hypothèse forte, mais pas encore totalement démontrée, qu'ils constituent le trait d'union entre une mesure ponctuelle et locale et une donnée spatiale exhaustive (plus ou moins résolue/étendue), l'échelon intermédiaire indispensable pour faire le lien entre les relevés *in situ* et le satellitaire (Alvarez-Vanhard et al., 2020).

déjà acquises afin d'éviter la revisite de certains sites d'étude par exemple. L'enjeu ne doit pas relever d'un institut ou d'un autre et doit pouvoir s'appuyer sur des structures locales en cohérence avec des plateformes produisant et fournissant de la donnée pour des collectifs scientifiques locaux ou régionaux (type DIPEE*/OSU/MSH).

D'autres part, les chercheurs en écologie et environnement sont généralement des utilisateurs finaux des matériels proposés, des « thématiciens » qui n'ont peu ou prou d'interactions avec d'autres communautés largement impliquées dans les développements en robotique ou capteurs, ou encore dans la définition des programmes spatiaux. Si des développements semblent évidents, l'interdisciplinarité nécessaire au développement de nouvelles données ou à la mise en cohérence des données drone/satellitaire ou drone/*in situ*, n'est pas assez développée.

Perspectives et recommandations

Trois perspectives/recommandations majeures ressortent des discussions qui ont eu lieu dans ce sous-atelier en lien avec la structuration, les dé-

veloppements scientifiques et l'interdisciplinarité. Concernant la structuration, il semble important de s'appuyer sur des réseaux émergents (MITI

Drones & Cap, capteurs en environnement...) pour recenser et faire connaître les matériels, les compétences existantes localement, les domaines d'applications actuels et possibles. Cela nécessite de « sortir les drones des instituts », tout en cherchant à inciter à une structuration de pôles régionaux interdisciplinaires/inter-instituts (DIPEE/OSU, MSH). Cela devrait permettre la mise en commun de moyens/gros équipements (drone/capteurs, moyens de calcul...), en phase avec les développements nécessaires pour la mise à disposition des données et de favoriser l'innovation.

Concernant les développements scientifiques et l'interdisciplinarité, trois pistes semblent essentielles :

- Inciter à la proactivité dans le domaine du développement de drones et de capteurs, notamment à travers la définition de cahiers des charges à destination de CNRS Sciences informatiques ou de CNRS Nucléaire & Parti-

cules qui aient du sens pour les applications en écologie et environnement (mise en cohérence des mesures locales, expérimentales) et qui anticipent de nouveaux besoins (continuum de mesures dans la Zone Critique - terrestre <-> marin par exemple, développement de nouveaux capteurs radar/SWIR*/hyperspectraux, suivi du carbone atmosphérique ou dans les sols...);

- inciter à poursuivre le changement de paradigme offert par ces données innovantes : passer de la statistique descriptive (où la donnée sert à fournir des variables explicatives vis-à-vis d'une variable écologique à expliquer) à une modélisation des flux (gènes, faune, air, eau...) grâce à la précision et structure 3D par exemple des données ;
- inciter au développement de méthodes permettant de mettre en cohérence les mesures au sol, par drone et satellitaires (IA, adaptation de domaine...) pour réussir enfin à relever le défi du changement d'échelle.

In situ

État des lieux et enjeux

Les réseaux de capteurs *in situ* s'entendent aujourd'hui comme des outils de surveillance automatisés, en continu, d'un domaine défini. Ils se sont développés pour enrichir les données acquises par des observateurs humains et systématiser des méthodologies d'observation objectivées, automatiser des tâches répétitives et/ou dangereuses, ou bien encore alerter sur des conditions spécifiques appelant à une action humaine. La météorologie a été pionnière dans ce domaine avec le déploiement des premières stations automatiques dès 1940, qui transmettaient déjà les observations par radio à un centre de données.

Tansley (1935) et Lindeman (1942) ont défini les écosystèmes comme le système indivisible de biota et de leur environnement, où les cycles organiques et inorganiques sont indissociables, s'organisant autour de flux de matières et d'énergie. Les capteurs se focalisent généralement sur la captation de ces variables

abiotiques, offrant des points de vue sur les interactions complexes entre le vivant et son environnement physique, qui régissent le fonctionnement des socio-écosystèmes. Ces outils techniques permettent également d'étendre nos sens et de faire émerger des contrôles invisibles (radon, polluants) ou inaccessibles (souterrains, volcans), et peuvent également, à certains égards, favoriser la reconnexion entre l'humain et la nature (Litleskare *et al.*, 2020).

L'implémentation des réseaux de capteurs – et donc la stratégie d'observation – est étroitement liée aux objectifs scientifiques des études. Par exemple, le croisement de plusieurs types de données sur des gradients permet de documenter des habitats, et amène ainsi à des éléments sur la définition des interactions biotiques-abiotiques et aux questions d'adaptation (Melero *et al.*, 2022). Les enjeux associés aux changements globaux appellent à des suivis holistiques sur des temps longs pour suivre les trajectoires

des socio-écosystèmes, identifier les cascades d'impact, points de bascules (Ragueneau *et al.*, 2018). Les systèmes de suivis *in situ* doivent ainsi être capables de couvrir des domaines d'étendues variables pour répondre à ces questions scientifiques : du très local (micro-météorologie), à l'échelle continentale (ex. le projet A20 https://acousticobservatory.org/home_1/), en passant par les systèmes expérimentaux (ex. mésocosmes) et les observatoires, sur une très grande diversité de variables.

La portée des dispositifs techniques de captation, lorsqu'ils sont déployés au sein des dispositifs d'observation dans les territoires (Bretagnolle *et al.*, 2018, Gaillardet *et al.*, 2018), s'élargit pour favoriser la collaboration entre disciplines, mais également pour permettre l'articulation des connaissances entre les sphères académiques

Verrous

Le principal jalon des données acquises localement par de l'instrumentation *in situ* concerne la représentativité spatiale de la mesure (micro ou méso échelle). Celui-ci a été levé à travers la mise en place de réseaux de mesures. Les enjeux d'observation à distance par des réseaux de capteur *in situ* couvrent l'ensemble des étapes de la conception du capteur, de la définition d'une stratégie d'observation, du déploiement *in situ*, jusqu'à la FAIRisation des données générées. Les verrous peuvent ainsi être classés selon des critères technologiques, techniques, de stratégie d'observation et de définition du contenu informatif.

Les systèmes de mesure à distance permettent de limiter la présence humaine sur les sites (notamment dans les zones à risques) et d'accompagner les tâches répétitives (telles que le téléchargement des données ou le remplacement de batterie). Ces contraintes mettent en avant un double verrou d'autonomie, c'est-à-dire de fonctionnement sur des sources d'énergie intermittentes et de télétransmission des données. Ce verrou répond également aux enjeux de réduction de l'empreinte carbone. La démultiplication des types de capteurs et la densification des systèmes de mesure *in situ* pose la question de la maintenabilité des outils et de leur suivi. Si la transmission des données favorise la maintenance préventive, la présence sur site reste néces-

saire pour assurer le bon fonctionnement, remplacer les capteurs et les étalonner le cas échéant. Ainsi, les variables essentielles, qu'elles soient climatiques (<https://public.wmo.int/en/programmes/global-climate-observing-system/essential-climate-variables>) ou de biodiversité (<https://geobon.org/ebvs/what-are-ebvs/>) restent l'expression d'un consensus communautaire pour définir des preuves empiriques nécessaires pour documenter, comprendre et gérer l'évolution du climat et de la biodiversité. Cela dit, la pertinence d'une observation « essentielle » est contrebalancée par une contrainte de faisabilité de la mesure, c'est-à-dire réalisable à l'aide de méthodes éprouvées *in situ*, économiquement viable et durables dans le temps. Ces notions soulignent le rôle transformateur de facteurs technologiques - et de leur appropriation - dans l'évolution de la recherche et des objectifs de suivi et d'évolution des socio-écosystèmes.

saire pour assurer le bon fonctionnement, remplacer les capteurs et les étalonner le cas échéant.

La crédibilité de la donnée acquise impose une qualification des capteurs et des protocoles de mesure. Les nouvelles technologies et le développement du numérique ont transformé la collecte des données, avec une diversification importante des types de capteurs (notamment bas coût) et d'acquisition des données (sciences participatives). Ces nouveaux outils et nouvelles pratiques ont fait émerger de nouvelles questions relatives à la confiance dans les données, mais également de nouvelles questions légales, éthiques et d'acceptabilité sociale dans l'usage des capteurs et des données.

Les données doivent être accompagnées de métadonnées qui décrivent les conditions, matériels et protocoles d'acquisitions. En termes métrologiques, toute donnée doit être accompagnée d'une estimation des incertitudes (qualité d'un résultat de mesure par rapport à la réalité), *a minima* d'une erreur (représentation de la différence entre une valeur mesurée d'une grandeur et une valeur de référence). Cette étape est cruciale puisque les incertitudes donnent une valeur à la donnée, son apport informatif, qui est à comparer directement à notre capacité d'expliquer les données (par exemple par des modèles).

À titre d'exemple, le développement récent des méthodes d'analyse du bruit sismique a permis de faire un bon fondamental en sciences de la Terre (Lecocq *et al.*, 2017), et cela a été possible grâce à une bancarisation systématique de toutes les données enregistrées par les sismographes, y compris en dehors des périodes d'activité sismiques. Ainsi, des données perçues aujourd'hui comme bruit, c'est-à-dire non expliquées, pourraient demain devenir une information à la lumière de nouveaux développements.

Les capteurs nous offrent d'étendre nos sens et d'être opérationnels sur site en continu. Il se pose ainsi la question de l'immersion dans le système observé. Le contrôle à distance implique que le système de mesure autorise le déclenchement d'actions plus élaborées. Il s'agit de générer des alertes appelant à une opération humaine, ou bien de faire évoluer le système d'observation lui-même lorsque les conditions l'imposent (conditions extrêmes ou singulières) : augmenter les cadences de prise de données, activer un outil spécifique (ex. échantillonner de l'eau) qui permettra d'enrichir les observations, sur le volet biotique notamment.

La gestion des flux de données générées reste

également un verrou important qui pose la question de la pertinence des données générées et de leur contenu informatif. Ainsi, l'exemple de capteurs passifs du type pièges photographiques est démonstratif. Le capteur génère des flux de données importants, alors que l'information pertinente reste l'occurrence d'un individu d'une certaine espèce. Les verrous sont ainsi doubles : à l'échelle du capteur, il semble nécessaire d'aller vers des capteurs qui embarquent une certaine intelligence synthétisant les données sous la forme d'une information directement utilisable. À l'échelle du réseau de capteurs, il s'agit de développer des indicateurs pour des usages spécifiques qui intègrent les données générées par un ensemble de capteurs. Par exemple, un système d'alerte d'un événement de salinisation des écosystèmes côtiers lors d'une surcote, nécessite d'intégrer à la fois une mesure de l'altitude relative entre le niveau marin et le domaine continental, mais également l'évolution de la conductivité de l'eau dans les eaux de surface et les eaux profondes. Encore une fois, un traitement des données au plus proche des capteurs permet de donner du sens à celles-ci. Ces systèmes d'intelligence déportée sont également cohérents avec les enjeux de sobriété énergétique et numérique.

Perspectives et recommandations

Les verrous identifiés mettent au centre des préoccupations une question de cohérence entre l'existence de produits/solutions techniques adaptables, cohérents avec les contraintes *in situ*, mais qui permettent également d'enrichir les approches scientifiques par de nouvelles données, plus précises, plus complètes, pour répondre aux besoins du développement des approches systémiques. Il s'agit ainsi de fédérer des communautés d'une manière très concrète et favoriser les interactions entre technologues, personnes de terrains, et chercheurs thématiques. Cette structuration transverse peut être opérationnalisée de deux manières :

- d'une part autour de réseaux métiers, tels que le Réseau Technologique sur les Capteurs en Environnement (RTCE*, <https://www.reseau-capteurs.cnrs.fr/>) qui rassemble déjà une large communauté autour de la métrologie *in natura* ;
- d'autre part des objets à observer (observatoires ou sites expérimentaux) au sein des infrastructures de recherche.

Le marché des capteurs « environnementaux » est en plein essor, et s'articule autour de nouvelles opportunités technologiques, notamment autour de capteurs bas coût. Au-delà de l'effet d'aubaine, l'enjeu est de nous donner la capacité de définir la portée de ces innovations et de juger de leur pertinence et de leur acceptabilité. Il est également important de réfléchir à des outils permettant :

- d'aller vers une homogénéisation du parc instrumental national et de favoriser le partage des expertises ;
- de renforcer l'interopérabilité des systèmes existants, notamment dans un cadre de transmission automatique des données. L'instrumentation frugale consiste à associer des composants élémentaires, génériques ou spécifiques, autour d'un cahier des charges précis sur un cas d'usage, tenant compte en amont des contraintes de terrains pour maximiser leur pertinence et durée de vie. L'intérêt pour la communauté doit également se concrétiser

par de nouveaux outils de cartographie et de partage de ressources documentaires, solutions techniques et savoir-faire. Ces développements, associant pleinement technologues et chercheurs au sein des réseaux métiers, des projets et des observatoires, ont le double intérêt (1) de favoriser l'agilité dans le développement et la reproduction des systèmes opérationnels et (2) de construire et fédérer des communautés d'utilisateurs pour que les outils répondent toujours mieux aux besoins exprimés.

L'observation à distance intègre des questions fondamentales sur les données produites par les capteurs et leur utilisation. Si les enjeux de FAIR-

isation sont pleinement intégrés et bien décrits dans le volet « données », l'enjeu de la gestion des flux de données en continu générées par les systèmes *in situ* reste une préoccupation importante pour faire émerger le contenu informatif des données produites pour générer des alertes et appelant à une réponse instrumentale ou humaine. La question soulevée s'articule autour des relations données – modèles, l'information la plus pertinente étant non prévisible, ou défiant l'attendu. L'intelligence artificielle est un des outils pouvant répondre à certains de ces enjeux, il s'agira à nouveau de favoriser les interactions avec des communautés numériques pour alimenter les systèmes de traitement embarqués.

Discussion et perspectives

Synthèse

Cette synthèse présente, pour chacune des modalités de captation de données à distance sur lesquelles les chercheurs ont une influence directe (exception faite des données collectées au travers des sciences participatives), l'état des lieux, les principaux verrous et enjeux à court et moyen termes.

Que les verrous soient éthiques, réglementaires, technologiques, structurels et organisationnels, ou encore financiers, des solutions existent et les développements tendanciels laissent présager une levée plus ou moins rapide de ceux-

ci. Pour cela, l'innovation technologique est un prérequis. Néanmoins, l'innovation sociale l'est tout autant et mérite une vigilance particulière : que ce soit en interne à la communauté scientifique (mise à disposition des informations, éviter les guerres de clochés, pratique de non-partage immédiat par les chercheurs encore terriblement présente...) ou vis-à-vis de la société civile (acceptabilité et perception des modalités d'acquisition), un accompagnement est indispensable pour favoriser et faciliter les changements de paradigmes évoqués.

L'observation à distance pour relever le défi du changement d'échelle ?

Ces nouvelles données et leur densité spatiale ou/et temporelle permettent d'envisager le passage d'une caractérisation d'une propriété biophysique, géochimique ou sociale à la caractérisation de processus socio-écologiques, physiques... Par ailleurs, la complétude de ces différentes modalités d'observation à distance permet d'envisager de mettre en relation des données ponctuelles pouvant présenter des résolutions spatiales ou temporelles plus fines avec des données 2D/3D, couvrant des étendues plus vastes, mais également de mieux appréhender les *continuums* (terre-mer par exemple) jusque-là forts cloisonnés. Ainsi, il devient possible d'explicitier finement des

données acquises par télédétection satellitaire ou drone (état, dynamique) à l'aide de données ponctuelles (*bio-logging, in situ*) et inversement, de pouvoir extrapoler des informations ponctuelles sur la base de leur similitude/base d'apprentissage colocalisée avec des données *raster*. Les mêmes principes sont envisageables entre des données de télédétection présentant des résolutions spatiales et/ou temporelles différentes (drones/satellites) (Alvarez-Vanhard *et al.*, 2021). *In fine*, nous pourrions espérer relever le vieux défi du changement d'échelle dans le suivi, l'analyse et la compréhension des processus biotiques/abiotiques/anthropiques et de leurs interactions.

De la nécessaire implication de la société

Dans cet atelier, les données dites sociales ont été peu abordées. Deux types de données peuvent se distinguer : celles relatives à la participation de la société à la captation de données pour densifier la collecte de données et celles relevant de la préférence, de la perception, des pratiques (déplacements, traces numériques) et des choix des individus et de la société. La non prise en compte de ce type d'observation à distance ici s'explique probablement parce que le monitoring et la captation de ce type de données relève, selon certains et peut-être de façon stéréotypée, plus de CNRS Sciences humaines & sociales que de CNRS Écologie & Environnement d'une part ; et plus certainement par les

compétences requises (non représentées par les porteurs de cet atelier). La réglementation contraignante (RGPD) rend ces données plus rares malgré la démocratisation récente des smartphones et des sciences participatives. Néanmoins, il paraît de plus en plus évident que ces données vont devenir essentielles pour mesurer la propension de la société à accepter des mesures politiques et réglementaires visant par exemple l'atténuation ou l'adaptation au changement global, une transition sociale, énergétique et environnementale. Ceci renforce clairement le besoin de développer des recherches socio-environnementales, où la donnée sociale et humaine et les enjeux de captations inhérents soient priorités.

Observation à distance sur le long terme : science ouverte, résolutions et sobriété

Volontairement, l'accès à la donnée acquise à distance n'a pas été abordé dans cet atelier puisqu'un atelier traitait spécifiquement de cette question. Néanmoins, compte tenu des enjeux de mise en relation des données issues des diverses modalités d'acquisition, il est fondamental de rendre ces données accessibles ouvertement, c'est-à-dire de veiller à leur FAIRisation. Pour ce faire, il est nécessaire de promouvoir la mise en relation des bases de données FAIR (GBIF, Data Terra, et autres Infrastructures de Données Spatiales) et de mettre en place une politique de la données cohérentes à l'échelle des divers instituts du CNRS. La mise à disposition est un préalable pour le suivi à long terme en écologie et environnement ainsi qu'à la valorisation des données. S'il y a un enjeu structurel fort (en ressources humaines, logicielles et matérielles), il est également fondamental d'agir sur les pratiques des scientifiques, encore archaïques parfois (« *ce sont mes données* », « *je ne le mettrai à disposition qu'une fois l'article publié* »...), au travers de méthodes incitatives voire pourquoi pas coercitives.

De plus, la question de la volumétrie des données qui sera générée par une démultiplication des capteurs et modalités de captation est clairement soulevée ici, et renvoie notamment à l'atelier « Données, après l'acquisition ». Si la pertinence

de la donnée (et leurs résolutions spatiale et temporelle) dépend avant tout de la question scientifique traitée, il semble que les résolutions les plus fines (dans la mesure du possible) doivent être envisagées. Elles peuvent être sélectionnées ou dégradées si nécessaire pour favoriser une certaine sobriété « scientifique ». Cela permettrait qu'elles puissent être revisitées ultérieurement par de nouvelles méthodes afin de détecter des processus/signaux faibles que les méthodes actuelles ne permettent pas.

Enfin, le capteur reste un moyen d'acquérir et d'articuler des connaissances. Les données acquises peuvent être considérées comme stratégiques pour documenter le fonctionnement et la trajectoire des socio-écosystèmes, notamment dans les observatoires, au sein des territoires. D'autre part, les besoins en matériaux et énergie pour construire, faire fonctionner et traiter les données ne sont pas neutres. La question de la place de l'instrumentation dans la recherche actuelle et dans les transitions socio-environnementales reste ouverte, mais nous oriente vers le nécessaire développement d'une instrumentation frugale, c'est-à-dire de systèmes d'observation adaptés aux conditions de terrain, ayant une longue durée de vie, capables de « grappiller » de l'énergie dans le milieu naturel, et générant des flux de données gérables.

Positionnement et enjeu à l'échelle européenne : vers une profonde innovation ?

Dans le contexte actuel de structuration européenne des infrastructures de recherche (IR) au travers du projet eLTER (H2020 PPP* et PLUS), la place de l'instrumentation d'acquisition de données à long terme est centrale et constitue même un critère d'éligibilité des sites scientifiques de suivi à long terme des systèmes socio-écologiques de la zone critique. Dès lors, bien que cela se place dans une perspective

de compétitivité interne à la recherche européenne, l'observation à distance et les données qu'elle produit devient un enjeu de plus en plus important, bouscule les pratiques, questionne l'organisation même du CNRS mais finalement devrait favoriser une innovation sociale et politique de la recherche française à l'aulne des enjeux actuels et de plus en plus prégnants des changements globaux.

RÉFÉRENCES

- Alvarez-Vanhard, E.G., Houet, T., Mony, C., Lecoq, L., Corpetti, T. (2020) Can UAVs fill the gap between in situ surveys and satellites for habitat mapping?, *Remote Sensing of Environment*, 243, 12p, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111780>
- Alvarez-Vanhard, E.G., Houet, T., Corpetti, T. (2021) UAV & Satellite synergies for optical remote sensing applications: a review. *Science of Remote Sensing*, vol. 3, 14 p. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100019>
- Bretagnolle, V., Berthet, E., Gross, N., Gauffre, B., Plumejeaud, C., Houte, S., et al. (2018). Towards sustainable and multifunctional agriculture in farmland landscapes: lessons from the integrative approach of a French LTSE platform. *Science of the Total Environment*, 627, 822-834.
- Gaillardet, J., Braud, I., Hankard, F., Anquetin, S., Bour, O., Dorflinger, N., et al. (2018). OZCAR: The French network of critical zone observatories. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1-24.
- Lecocq, T., Longuevergne, L., Pedersen, H. A., Brenguier, F., Stammer, K. (2017). Monitoring ground water storage at mesoscale using seismic noise: 30 years of continuous observation and thermo-elastic and hydrological modeling. *Scientific reports*, 7(1), 1-16.
- Lindeman, R.L. (1942). The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology*, 23: 399-417.
- Lilleskare, S.E., MacIntyre, T., Calogiuri, G. (2020). Enable, reconnect and augment: a new ERA of virtual nature research and application. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(5), 1738.
- Melero, Y., Evans, L.C., Kuussaari, M., Schmucki, R., Stefanescu, C., Roy, D. B., et al. H. (2022). Local adaptation to climate anomalies relates to species phylogeny. *Communications Biology*, 5(1), 143.
- Pereira, H.M., Ferrier, S., Walters, M., Geller, G.N., Jongman, R.H.G., Scholes, et al. (2013). Essential biodiversity variables. *Science* 339, 277-278. <https://doi.org/10.1126/science.1229931>
- Prange, S., Gehrt, S. D., Hauver, S. (2011). Frequency and duration of contacts between free-ranging raccoons: uncovering a hidden social system. *Journal of Mammalogy*, 92, 1331-1342.
- Ragueneau, O., Raimonet, M., Maze, C., Coston-Guarini, J., Chauvaud, L., Danto, A. et al. (2018). The impossible sustainability of the Bay of Brest? Fifty years of ecosystem changes, interdisciplinary knowledge construction and key questions at the science-policy-community interface. *Frontiers in Marine Science*, 5, 124.
- Tansley, A.G., (1935). The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 16, 284-307.

